ISSN 1992-5980

ВЕСТНИК

ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 8 №2(37)

2008

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2008

Т.8 №2(37)

Теоретический
и научно-практический журнал

Рекомендован ВАК для публикаций результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата наук по направлениям: «Управление, вычислительная техника и информатика», «Инженерно-агропромышленные специальности»

Издается с 1999 г.

Выходит один раз в квартал

ИЮНЬ 2008 г.

Учредитель – **Донской государственный технический университет**

Главный редактор д-р техн. наук Б.Ч. Месхи
Зам. главного редактора д-р техн. наук И.В. Богуславский
Ответственный секретарь д-р техн. наук В.П. Димитров

Редакционная коллегия:

Направление «Управление, вычислительная техника и информатика»:
д-р техн. наук Р.А.Нейдорф, д-р техн. наук М.Е.Попов,
д-р техн. наук Б.В.Соболь, д-р техн. наук А.К.Тугенгольд

Направление «Инженерно-агропромышленные специальности»:
академик РАСХН, д-р техн. наук И.А.Долгов, д-р техн. наук В.П.Жаров,
д-р техн. наук Ю.И.Ермольев, д-р техн. наук И.А.Хозяев,
д-р техн. наук О.А.Полушкин

Направление «Машиностроение»:
д-р техн. наук А.П.Бабичев, д-р техн.наук В.Л.Заковоротный,
д-р техн. наук А.С.Кужаров, д-р техн. наук В.Ф.Лукьянов,
д-р техн. наук В.Г.Люлько, д-р техн. наук В.Н.Пустовойт,
д-р техн. наук Ю.Н.Резников, д-р техн. наук А.А.Рыжкин,
д-р техн. наук В.С.Сидоренко, д-р техн. наук А.Н.Соловьев,
д-р техн. наук М.А.Тамаркин, д-р техн. наук А.Н.Чукарин

Над номером работали: О.А.Водолазова, И.В.Кикичева

Подписано в печать 30.05.2008.
Формат 30x42/8. Гарнитура «Tahoma». Печать офсетная.
Усл.печ.л. 12,1. Тираж 1000 экз. Заказ 282. Цена 85 р.

Адрес редакции:
344000, г.Ростов-на-Дону, пл.Гагарина, 1,
тел. 2-738-747

Адрес издательского центра:
344000, г.Ростов-на-Дону, пл.Гагарина, 1,
тел. 2-738-741, 2-738-322

http://www.dstu.edu.ru/vestnik/index.html
Регистрационное свидетельство № ПИ № ФС 10-6367

© Издательский центр ДГТУ, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Дрюк В.А., Сороченко С.Ф. Математическое моделирование движения зернового вороха с динамическим разравниванием по решету системы очистки зернокомбайна..... 113

Волков В.В. Планирование эксперимента и обработка результатов при помощи программного средства EOSUPPORT..... 120

Водолазов Н.Н. Об особенностях потока в сетях с барьерной достижимостью..... 127

ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Донцов Н.С., Погорелов Н.П. Исследование влияния влажности на показатели процесса сепарации зернового вороха в пневмоканале машины предварительной очистки (МПО)..... 137

Партко С.А. Оптимизация колебательных параметров ходовой системы уборочного комбайна..... 141

Димитров В.П., Борисова Л.В. О формализации задачи технологической регулировки комбайна..... 145

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Рядченко Ю.В., Рядченко Г.В. Расчет натягов при сборке замкнутых технологических пакетов для нанесения композиционных покрытий на подшипники скольжения..... 157

Мордвинкин В.А. Несущая способность упорного газостатического подшипника (УГСП) с учетом вращения..... 165

Кохановский В.А., Сидельник-Рубанова Ю.В. Пусковые характеристики металлополимерных трибосистем с композиционным покрытием.... 170

Илясов В.В., Рыжкин А.А., Илясов А.В. Физическая модель износостойкости металломатричных композиционных материалов..... 177

Минаков В.С., Чиликин Д.А., Малеев Д.Н. Дискретное управление износостойкостью формообразующего инструмента..... 188

Сергеева М.Х., Кохановский В.А. Наноструктурная модификация поверхности..... 192

Симоненко А.Н., Кузнецов Д.М., Пашко С.А. Мониторинг процесса «старения» расплава солей при карботитанировании в индукционных соляных печах-ванных..... 197

Курень С.Г., Дьяченко А.Д., Сокол Н.А., Вассель С.С. Оптимизация состава автомобильного антифриза..... 203

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК631.354.2 (043.3)

В.А. ДРЮК, С.Ф. СОРОЧЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА С ДИНАМИЧЕСКИМ РАЗРАВНИВАНИЕМ ПО РЕШЕТУ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ЗЕРНОКОМБАЙНА

Представлены теоретические и экспериментальные исследования движения зернового вороха по решету системы очистки зерноуборочного комбайна с динамическим разравниванием. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных исследований.
***Ключевые слова**: математическая модель, зерновой ворох, решето, интервалы движения, траектория движения.*

Введение. На кафедре сельскохозяйственного машиностроения АлтГТУ разработано устройство для разравнивания зернового вороха на решете зернокомбайна, предназначенного для повышения эффективности работы системы очистки при поперечном крене молотилки [1]. В предложенном устройстве решету сообщаются колебания как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Для определения параметров устройства для динамического разравнивания вороха на решете очистки создана математическая модель, описывающая движение вороха в зависимости от различных условий и параметров, в том числе и параметров выравнивателя.

В основу теоретического описания движения зернового вороха положена математическая модель С.А. Алферова [2]. Развитие этой модели выполнено для случая появления бокового крена решета и динамического разравнивания вороха по его ширине.

Сущность метода. Для решения дифференциальных уравнений движения частиц вороха приняты следующие допущения:

- кинематика решета одинакова по всей длине. Перемещение верхнего решета происходит по хорде, а не по дуге. Движение решета определяется известными уравнениями [2]:

$$\begin{cases} \xi = r \cdot \cos \omega t \\ \dot{\xi} = -\omega \cdot r \cdot \sin \omega t \\ \ddot{\xi} = -\omega^2 r \cdot \cos \omega t, \end{cases} \qquad (1)$$

где ξ, $\dot{\xi}$ и $\ddot{\xi}$ – соответственно перемещение, скорость и ускорение решета в направлении оси ξ; r – амплитуда продольных колебаний решета; ω – угловая скорость вращения приводного вала;

- угловая скорость вращения приводного вала постоянна, ω= const;

- в качестве фрикционных свойств зернового вороха принимаем свойства соломистых частиц;

- сила воздействия воздушного потока на частицу постоянна ввиду ее малой относительной скорости;

- движение элемента слоя зернового вороха рассматривается как движение центра масс плоского тела;

- коэффициенты трения f_1 и f_2 зернового вороха при движении его по решету очистки вперед и назад неодинаковы, т.е. $f_1 << f_2$.

Схема привода очистки и схема сил, действующих на частицу, находящуюся на поверхности колеблющегося решета, представлены на рис.1 и 2.

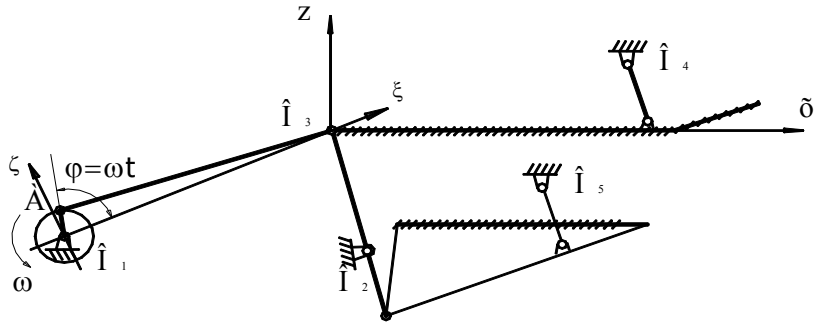


Рис.1. Схема привода очистки

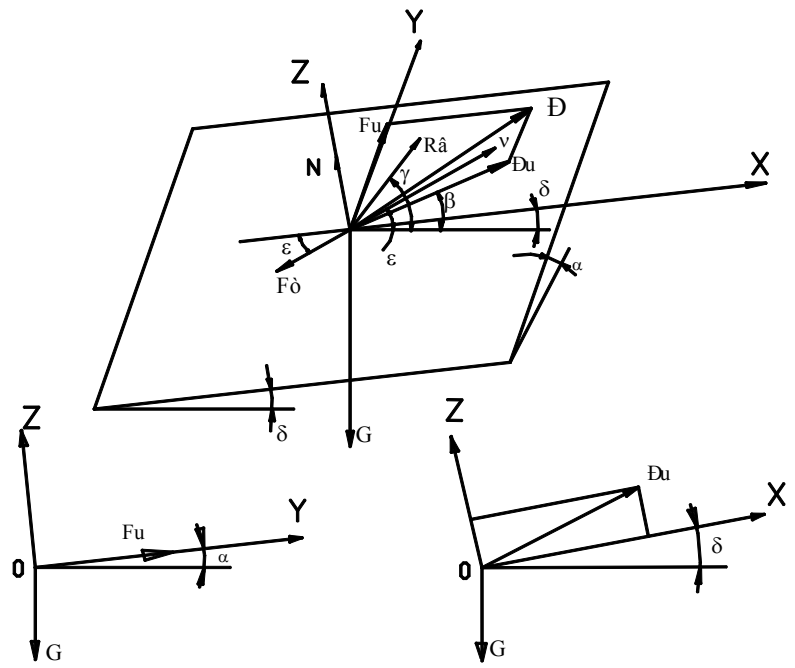


Рис.2. Схема сил, действующих на частицу на решете очистки зернокомбайна

При решении дифференциальных уравнений движения частицы вороха по решету определено три качественно различных состояния частицы. Первое – относительный покой (частица находится в покое на колеблющемся решете). Второй – скольжение (частица скользит по поверхности решета, в каком-либо направлении). Третье – полет (частица отрывается от решета и летит над ним).

Дифференциальные уравнения движения вороха имеют вид:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2} = P_U\cdot\cos(\beta-\delta)+R_B\cdot\cos(\gamma-\delta)\mp F_{t1,2}\cdot\cos\varepsilon - G\ \cdot\cos\alpha\cdot\sin\delta \\ m\dfrac{d^2y}{dt^2} = F_U - G\ \cdot\sin\alpha\cdot\cos\delta\mp F_{t1,2}\cdot\sin\varepsilon \\ m\dfrac{d^2z}{dt^2} = P_U\cdot\sin(\beta-\delta)+R_B\cdot\sin(\gamma-\delta)+N-G\ \cdot\cos\alpha\cdot\cos\delta o \end{cases} \quad (2)$$

где m – масса частицы; t – время; $P_u = m\omega^2 r\cos\omega t$ – сила инерции частицы от продольных колебаний решета (здесь m – масса частицы); β – угол направления колебаний решета относительно горизонта; δ - угол наклона решета к горизонту в продольной плоскости; $R_B = mg\dfrac{U^2}{U_B^2}$ – сила действия воздушного потока (здесь U – скорость воздушного потока, U_B – скорость витания частицы); γ - угол наклона воздушного потока; $F_{t1,2}$ - сила сопротивления перемещению частицы; α – угол наклона решета к горизонту в поперечной плоскости; $G = mg$ – сила тяжести; $F_u = m\omega^2 r_П\cos\omega t$ – сила инерции частицы от поперечных колебаний решета (здесь $r_П$ – амплитуда поперечных колебаний решета); N – нормальная реакция (определена ниже). Верхние знаки применяются при движении частицы вперед по решету, нижние – при движении назад по решету.

Определены скорости относительного движения частиц зернового вороха вдоль осей X и Y:

$$V_{X(+)} = A_1\cdot\omega\ \cdot r\cdot(\sin\omega t\ -\sin\omega t_1)+B_1\cdot g\frac{U^2}{U_B^2}(t-t_1)-g\cdot\cos\alpha\cdot D_1\cdot(t-t_1), \quad (3)$$

где t_1 – начальное время движения частицы в положительном направлении оси x;

$$A_1 = \cos(\beta-\delta)+f_1\cdot\sin(\beta-\delta)\cdot\cos\varepsilon;$$

$$B_1 = \cos(\gamma-\delta)+f_1\cdot\sin(\gamma-\delta)\cdot\cos\varepsilon;\quad D_1 = \sin\delta+f_1\cdot\cos\delta\cdot\cos\varepsilon\cdot$$

$$V_{X(-)} = A_2\cdot\omega\ \cdot r\cdot(\sin\omega t\ -\sin\omega t_2)+$$

$$+B_2\cdot g\frac{U^2}{U_B^2}(t-t_2)-g\cdot\cos\alpha\cdot D_2\cdot(t-t_2), \quad (4)$$

где t_2 – начальное время движения частицы в отрицательном направлении оси x;

$$A_2 = \cos(\beta - \delta) + f_2 \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \cos\varepsilon;$$
$$B_2 = \cos(\gamma - \delta) + f_2 \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \cos\varepsilon;$$
$$D_2 = \sin\delta + f_2 \cdot \cos\delta \cdot \cos\varepsilon.$$

Скорости относительного движения частиц зернового вороха вдоль оси Y:

$$V_{y(+)} = A_3 \omega \cdot r_П \cdot (\sin\omega s - \sin\omega t_3) +$$
$$+ f_y \cdot \omega \cdot r \cdot (\sin\omega s - \sin\omega t_3) \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \sin\varepsilon + \quad (5)$$
$$+ f_y g \frac{U^2}{U_B^2} \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \sin\varepsilon \cdot (t - t_3) - B_3 \cdot g \cdot \cos\delta \cdot (t - t_3),$$

где t_3 – начальное время движения частицы в положительном направлении оси y; $A_3 = 1 - f_y \cdot \sin\varepsilon$; $B_3 = \sin\alpha + f_y \cdot \cos\alpha \cdot \sin\varepsilon$; f_y – коэффициент трения частицы зернового вороха по поверхности решета при движении вдоль оси Y.

$$V_{y(-)} = A_4 \cdot \omega \cdot r_П \cdot (\sin\omega \cdot t - \sin\omega \cdot t_4) -$$
$$- f_y \cdot \omega \cdot r \cdot (\sin\omega \cdot t - \sin\omega \cdot t_4) \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \sin\varepsilon - \quad (6)$$
$$- f_y \cdot g \cdot \frac{U^2}{U_B^2} \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \sin\varepsilon \cdot (t - t_4) - B_4 \cdot g \cdot \cos\delta \cdot (t - t_4),$$

где t_4 – начальное время движения частицы в отрицательном направлении оси y; $A_4 = 1 - f_y \cdot \sin\varepsilon$; $B_4 = \sin\alpha - f_y \cdot \cos\alpha \cdot \sin\varepsilon$.

Определены границы интервалов возможных режимов движения вороха по поверхности решета. Интервал 1(частица на решете) наблюдается при N/m>0, интервал 2 (полет частицы над решетом) при N/m<0, здесь

$$\frac{N}{m} = g \cdot \cos\alpha \cdot \cos\delta - \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(\beta - \delta) - g \cdot \frac{U^2}{U_B^2} \cdot \sin(\gamma - \delta). \quad (7)$$

Интервал 1_+ (скольжение вперед) возможен при положительном значении ускорения частицы ($\ddot{x} > 0$), интервал 1_- (скольжение назад) возможен при отрицательном значении ускорения частицы ($\ddot{x} < 0$). Соответствующие условия получаются из первого уравнения системы уравнений (1). Границы интервалов определены из системы уравнений (1) при $\ddot{x} = 0,\ \dot{x} = 0,\ \ddot{y} = 0, \dot{y} = 0$. В соответствии с этими положениями получено уравнение, оценивающее влияние параметров на направление возможного движения частицы в переходный момент времени:

$$tg\varepsilon = \frac{\omega^2 \cdot r_П \cdot \cos\omega \cdot t - g \cdot \sin\alpha \cdot \cos\delta}{\omega^2 \cdot r \cdot \cos\omega \cdot t \cos(\beta - \delta) + g \cdot \frac{U^2}{U_B^2} \cdot \cos(\gamma - \delta) - g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta}. \quad (8)$$

Рассмотрен полет частицы над плоскостью решета с момента ее отрыва t_0 (определяется при N/m=0 по уравнению (7)) до падения на решето. Начальные условия полета частицы (t=0): проекции перемещения частицы на координатные оси $X_0=0$, $Y_0=0$, $Z_0=0$; проекции скорости частицы V_{X0}, V_{Y0}, V_{Z0} определяются по уравнениям (3)–(6) при $t=t_0$.

Дифференциальные уравнения полета частицы зернового вороха имеют вид:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2} = R_B\cdot\cos(\gamma-\delta) - G\ \cdot\cos\alpha\cdot\sin\delta \\ m\dfrac{d^2y}{dt^2} = G\ \cdot\sin\alpha\cdot\cos\delta \\ m\dfrac{d^2z}{dt^2} = R_B\cdot\sin(\gamma-\delta) - G\ \cdot\cos\alpha\cdot\cos\delta. \end{cases} \qquad (9)$$

Установлено, что при движении по решету частица вороха отрывается от поверхности в интервале от 0,95 до 2,18 рад. Скольжение частицы вперед возможно в интервале от 0,35 до 2,78 рад. Скольжение частицы назад по решету не происходит. Остальной промежуток времени частица находится на решете в состоянии относительного покоя. Момент падения частицы на решето определялся графоаналитическим способом с помощью пакета Mathcad путем приравнивания координаты z решета и частицы.

При определении траектории движения вороха по поверхности решета суммировалось перемещение частицы в каждом интервале. Результаты расчетов представлены на рис.3. Как видно из графика, представленного на рис.3,а, при возрастании поперечного крена решета увеличивается смещение вороха в направлении уклона. Так, при $\alpha=8^0$ угол $\varepsilon=-8{,}1^0$. Расчеты показывают, что действительно происходит смещение вороха к одной из боковин очистки при наличии поперечного крена, как отмечалось ранее. Результаты расчетов, показанные на рис.3,б, подтверждают наше предположение о возможности изменения направления движения вороха при использовании механизма для придания решету дополнительных поперечных колебаний. При $\alpha=8^0$ и $r_п=5$мм проекция движения вороха на ось Y положительна, т.е. происходит перемещение в сторону, противоположную уклону ($\varepsilon=3{,}6^0$). При дальнейшем увеличении $r_п$ наблюдается более стремительное перемещение вороха вверх по решету (при $r_п=10$мм $\varepsilon=18{,}3^0$, при $r_п=15$мм $\varepsilon=26{,}4^0$). Изменение направления движения вороха приводит к его разравниванию и снижению уровня потерь зерна за системой очистки при работе на пологих склонах (происходит динамическое разравнивание вороха).

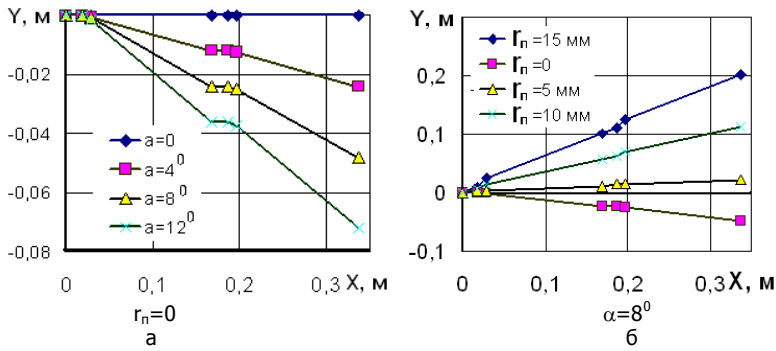


Рис.3. Результаты теоретического расчета траектории движения вороха за два оборота приводного вала очистки

Результаты экспериментов. Для проверки точности теоретических исследований проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке, состоящей из рамы, привода и жалюзийного решета, колеблющегося в продольном и поперечном направлениях (рис.4).

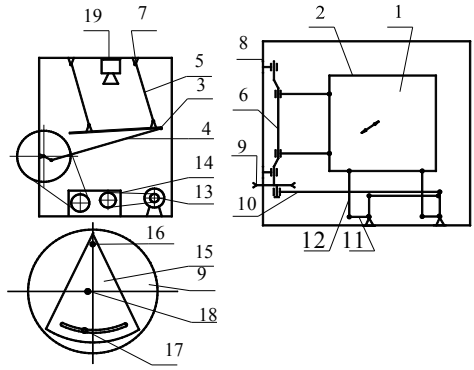


Рис.4. Лабораторная установка для определения траекторий движения зернового вороха по решету: 1 – решето; 2 – стан; 3 – кронштейн; 4 – шатун; 5 – подвеска; 6 – приводной вал; 7 – шаровой шарнир; 8 – рама стенда; 9 - приводной шкив; 10 – дополнительный шатун; 11 – двуплечий рычаг; 12 – тяга; 13 – электродвигатель; 14 – бесступенчатый редуктор; 15 – лист; 16 – ось; 17 – болт; 18 – ось; 19 - видеокамера

Определяли траекторию движения и скорость перемещения частиц вороха по решету в продольном и поперечном направлениях при наклоне установки α, равном 0°, 4°, 8°, 12° и 16^0 (амплитуда поперечных колебаний равна 0), и при наклоне 8° и амплитуде поперечных колебаний $r_П$, равной 5, 10 мм. Амплитуда продольных колебаний в опытах была равной 30 мм. Эксперименты проводили без обдува решета воздухом.

Процесс движения вороха по решету записывали на видеокамеру, установленную над решетом. Повторность опытов равна 6. Полученное изображение вводили в ЭВМ с помощью программы Adobe Premier 4.2. В каждой повторности из видеозаписи выделяли четыре стоп-кадра (один в начальной точке движения вороха, второй в конечной точке и два в средних точках), которые обрабатывали графическим редактором. При этом в каждом кадре выделяли пучок вороха и находили координаты его центра, по которым определяли перемещения в продольном и поперечном направлениях. Результатом исследований является: $\varepsilon_{ср}$ – средний угол отклонения траектории пучка вороха от продольной оси установки и σ - среднеквадратическое отклонение угла ε. Результаты опытов представлены в таблице.

Сравнительные результаты экспериментальных и теоретических исследований

α, ^{0}	$r_п$, мм	$\varepsilon_{ср}$(эксп.),^{0}	σ	ε (теор.),^{0}	Погрешность, %
0	0	1,45	0,52	0	1,6
4	0	-5,7	0,64	-4,06	1,9
8	0	-7,9	0,76	-8,1	0,24
12	0	-11,8	0,31	-12,0	0,20
16	0	-12,8	0,61	-15,4	3,49
8	5	2,4	0,29	3,6	1,28
8	10	13,0	0,23	18,3	4,89

Выводы. Определены режимы и параметры движения зернового вороха на решете очистки комбайна с динамическим выравниванием. Доказано, что дополнительные поперечные колебания решета позволяют изменять направление движения зернового вороха по решету. С помощью математической модели движения зернового вороха найдена зависимость направления движения вороха от параметров выравнивателя и других условий (например, поперечного крена), позволяющая подобрать оптимальные регулировки выравнивателя. Достоверность теоретических исследований и расчетов подтверждена экспериментально.

Библиографический список

1. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна: пат. 2177683. Российская Федерация: МКИ[7] A01F12/44 / Сороченко С.Ф., Дрюк В.А.; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Опубл. в БИ 10.01.02. Бюл. №1.

2. *Алферов С.А.* Воздушно-решетные очистки зерноуборочных комбайнов / С.А.Алферов.- М.: Агропромиздат, 1987.- 160 с.

Материал поступил в редакцию 5.05.08.

V. DRUK, S. SOROCHENKO

THE THEORETICAL DESCRIPTION OF THE MOTION GRAIN MATERIAL ON THE SIEVE OF THE SYSTEM CLEANING WITH DYNAMIC LEVELING

In article are presented theoretical and experimental studies of the motion grain material on sieve the system cleaning of the combine harvester with dynamic leveling. The comparison of the theoretical and experimental studies is made.

ДРЮК Виктор Андреевич (р. 1976), кандидат технических наук (2006), доцент кафедры СХМ АлтГТУ. Окончил Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (1998).
Сфера научных интересов: система очистки зерноуборочного комбайна.
Имеет 15 научных публикаций.

СОРОЧЕНКО Сергей Фёдорович (р. 1960), кандидат технических наук (1996), доцент. Окончил Алтайский политехнический институт им. И.И. Ползунова (1982).
Сфера научных интересов: система очистки зерноуборочного комбайна, сепарация зерна, моделирование сельскохозяйственных процессов.
Имеет 70 научных публикаций, в том числе одно учебное пособие.

УДК 519.242:004.42

В.В. ВОЛКОВ

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА EOSUPPORT

Описываются возможности программного средства EOSupport, разработанного автором и предназначенного для поддержки принятия решений в задачах, требующих планирования эксперимента и статистической обработки результатов. Приводятся научные результаты некоторых практических применений программы.
Ключевые слова: *планирование эксперимента, дисперсионный анализ, описание поверхности отклика, оптимизация процесса.*

Введение. Существует множество программных средств, предназначенных для автоматизации вычислений и осуществляющих поддержку принятия решений в разнообразных задачах, связанных с планированием эксперимента. Однако практически все они являются разработками зарубежных университетов или фирм, не поддерживают русскоязычный интерфейс и являются платными программными продуктами [4]. Поэтому является актуальной задача создания собственной программы для поддержки планирования экспериментов.

Реализованные методы. Созданная ранее автором функционирующая версия программы EOSupport (Experimental Optimization Support, Система поддержки экспериментальной оптимизации), позволяет строить линейные и квадратичные регрессионные модели (содержащие до 10 факторов) исследуемых процессов, а также проводить статистическую обработку получаемых результатов.

Для построения линейной модели пользователю предоставляется возможность выбора между полным и дробным факторным экспериментом (ПФЭ и ДФЭ соответственно). В случае выбора полного факторного эксперимента в линейную модель можно дополнительно включить произвольные эффекты взаимодействия факторов. При проведении факторного эксперимента используется схема с одинаковым количеством повторных опытов. Эти дополнительные опыты позволяют оценить дисперсию единичного измерения $s^2_{восп}$:

$$s^2_{восп} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{u=1}^{m}\left(y_{iu} - \overline{y}_i\right)^2}{N\left(m-1\right)} = \frac{\sum_{i=1}^{N} s_i^2}{N}, \qquad \overline{y}_i = \frac{\sum_{u=1}^{m} y_{iu}}{m}, \tag{1}$$

где $i = 1..N$ - номер строки матрицы планирования; $u = 1..m$ - номер повторного опыта; s_i^2 - дисперсия отклонения повторных опытов в каждой точке плана от среднего значения отклика в этой точке; y - матрица $N \times m$ откликов; число степеней свободы $s^2_{восп}$ равно $f_2 = N\left(m-1\right)$.

Коэффициенты регрессионной модели рассчитываются также на основании средних значений $\overline{y}_i$, что обеспечивает высокую точность их оценки:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{ij}\overline{y}_i}{N},\ j = 1..l, \qquad (2)$$

где l - количество коэффициентов в модели.

Статистический анализ линейной модели состоит в следующем. Сначала проверяется гипотеза об однородности дисперсий s_i^2 по критерию Кохрена. Затем при помощи F-критерия Фишера проверяется гипотеза об адекватности модели и, наконец, для каждого рассчитанного коэффициента b_j можно проверить его значимость по t-критерию Стьюдента [1]. Данный набор критериев позволяет достаточно полно оценить надежность полученных результатов эксперимента.

Пример 1. *Использование ПФЭ для исследования взаимодействий факторов в «игрушечном гольфе».* Рассмотрим эксперимент по забрасыванию мяча на заданное расстояние при помощи специальной установки, называемой «игрушечный гольф» [3]. Управляемые факторы: x_1 - длина биты (или клюшки); x_2 - угол отклонения биты перед ударом; x_3 - масса дополнительного груза биты. В качестве отклика выступает расстояние y, которое преодолеет мяч после удара. Необходимо исследовать взаимодействие между факторами и построить регрессионную модель для предсказания результатов произвольного удара.

Методы испытаний. Для решения поставленной задачи подходит полный факторный эксперимент, позволяющий получить неполную квадратичную модель, содержащую линейные члены и эффекты парных взаимодействий. Интервалы варьирования факторов и некоторая дополнительная информация представлены в табл.1. Сгенерированный EOSupport план эксперимента и результаты непосредственных измерений представлены в табл.2.

Таблица 1

Общие данные об эксперименте

Фактор	Название	Единица	Уровень -1	Уровень +1
x_1	Длина	дюйм	5.50	11.50
x_2	Угол	градус	20.00	60.00
x_3	Масса	кг	0.00	2.00
Отклик	Название	Единица		
y	Расстояние	дюйм		
Тип плана	Полный факторный (варьирование факторов на 2 уровнях)			
Модель	$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$			
Количество повторных опытов	3			

Таблица 2

Матрица планирования и результаты непосредственных измерений

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2	y_3
1	1	1	1	1	1	1	1	116	110	121
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	39.0	35.0	37.0
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	22.5	24.0	23.0
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	8.00	8.50	8.00
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	76.0	89.0	82.0
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	16.0	17.5	16.0
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	16.5	16.0	19.5
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1.75	2.50	2.50

Результаты эксперимента и их обсуждение. В результате опытов были получены коэффициенты уравнения регрессии. Проведен статистический анализ модели в целом и ее коэффициентов в отдельности. Результаты сведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты статистического анализа эксперимента

Коэффициенты	Степень свободы	Оценка	t -экспер.	t -крит. (p =0.05)	Вывод
b_0	16	37.8	56.88	2.12	значим
b_1	16	21.8	32.81	2.12	значим
b_2	16	25.0	37.71	2.12	значим
b_3	16	8.16	12.29	2.12	значим
b_{12}	16	14.3	21.48	2.12	значим
b_{13}	16	1.55	2.34	2.12	значим
b_{23}	16	5.22	7.86	2.12	значим
Дисперсия	Ст. свободы	Оценка			
$s^2_{ад}$	1	59.38			
$s^2_{восп}$	16	10.58			
Модель			F -эксп.	F -крит. (p =0.01)	
			5.61	8.5	модель адекватна

Получена следующая регрессионная модель в кодированных единицах:

$$y = 37.8 + 21.8x_1 + 25x_2 + 8.16x_3 + 14.3x_1x_2 + \\ + 1.55x_1x_3 + 5.22x_2x_3,$$

в натуральных единицах:

$$y = 13.47 - 2.76x_1 - 1.03x_2 - \\ -6.68x_3 + 0.24x_1x_2 + 0.52x_1x_3 + 0.26x_2x_3,$$

из которой видно, что из всех парных эффектов взаимодействия наиболее сильным является взаимодействие x_1x_3 (длина биты и масса груза). Все вычисления проводились два раза: первый – при помощи авторской программы EOSupport и второй – при помощи коммерческого продукта Design-Expert trial-версии 7.1.4 фирмы Stat-Ease, Inc. Результаты полностью совпали.

Описание экстремальной области. После получения линейной модели, описывающей локальную область факторного пространства, исследователю надлежит принять решение о дальнейшем ходе исследования; следует ли оптимизировать процесс, двигаясь в направлении градиента (траекторию автоматически рассчитает EOSupport), либо область экстремума уже достигнута и необходимо построение более точной квадратичной модели. Чтобы выяснить это в EOSupport, существует специальная функция оценки кривизны поверхности отклика в области эксперимента. Для этого пользователю предлагается поставить несколько дополнительных опытов в центре плана. Мерой кривизны поверхности отклика может служить разность среднего значения этих откликов и свободного члена линейной модели [2].

Построение квадратичных моделей также легко осуществимо при поддержке EOSupport. Для этого в текущей версии имеется поддержка построения ортогональных центральных композиционных планов (ОЦКП), в которых факторы варьируются на пяти различных уровнях. Достаточно только указать количество факторов, количество повторных экспериментов и количество дополнительных экспериментов в центре плана, и система автоматически рассчитает величину «звездного плеча» α, а также смещение для квадратичных членов. Также можно достроить существующий план ПФЭ или ДФЭ до ОЦКП.

Обычно на практике проведение экспериментов является дорогостоящей и трудоемкой операцией, поэтому при планировании всегда стремятся уменьшить количество точек плана. Чтобы достичь этого без существенных потерь точности, применяется специальная схема, согласно которой повторные опыты, необходимые для оценки дисперсии единичного измерения, ставятся только в центре плана [5]. Использование данной схемы иллюстрирует следующий пример.

Пример 2. *Применение ОЦКП для оптимизации процесса очистки воды.* Вода, полученная после процесса осушения баков для хранения бензина, подвергалась очистке в пробной установке для исследования эффективности совместного влияния коагулянта (сульфата алюминия) и катионового флокулянта (полиэлектролита) группой ученых из Национального технического университета в Афинах [6].

Методы испытаний. Для построения квадратичных регрессионных моделей трех параметров оптимизации (мутность, наличие твердой взвеси, наличие нефтепродуктов) использовалось композиционное планирование. В качестве факторов были выбраны концентрации коагулянта, флокулянта и уровень pH. Автор настоящей статьи использовал полученные исследователями экспериментальные данные при апробации программы EOSupport для проверки вычисленных статистических оценок. Пример ограничивается лишь одним параметром оптимизации – уровнем замутненности воды, подвергшейся очистке. Общие данные представлены в табл.4 и 5.

Таблица 4

Общие данные об эксперименте

Фактор	Название	Единица	-1.414	-1	0	+1	1.414
x_1	Сульфат алюминия	мг/л	4	19	55	91	106
x_2	Полиэлектролит	мг/л	1	5	15	25	29
x_3	pH		5	5.5	7	8.5	9
Отклик	Название	Единица					
y	Мутность	%					
Тип плана	ОЦКП (варьирование факторов на 5 уровнях)						
Модель	$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$						
Количество опытов в центре плана	4						

Таблица 5

Матрица планирования и результаты непосредственных измерений

№	x_0	x_1	x_2	x_3	y	№	x_0	x_1	x_2	x_3	y
1	1	1	1	1	95.5	10	1	1.41	0	0	56.8
2	1	-1	1	1	69.7	11	1	0	-1.41	0	17.6
3	1	1	-1	1	11.6	12	1	0	1.41	0	41.5
4	1	-1	-1	1	25.6	13	1	0	0	-1.41	35.7
5	1	1	1	-1	68.9	14	1	0	0	1.41	58.8
6	1	-1	1	-1	55.8	15	1	0	0	0	30.9
7	1	1	-1	-1	56.8	16	1	0	0	0	28.7
8	1	-1	-1	-1	17.6	17	1	0	0	0	20.2
9	1	-1.41	0	0	52.6	18	1	0	0	0	25.9

Результаты эксперимента и их обсуждение. После проведения опытов были получены коэффициенты квадратичного уравнения регрессии. Проведен статистический анализ модели. Результаты представлены в табл.6.

Таблица 6

Результаты эксперимента

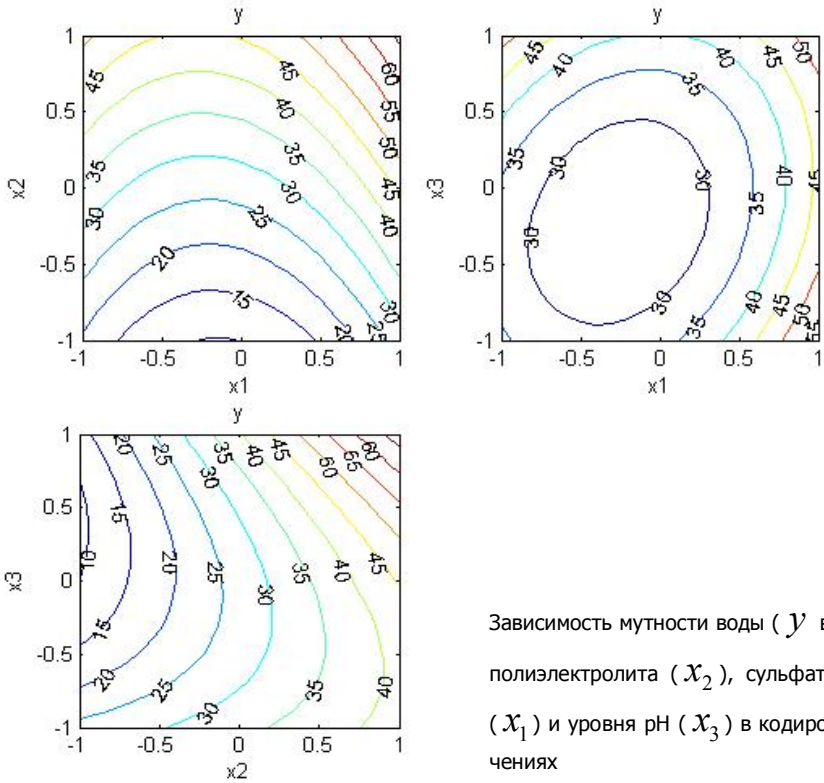
Коэффициент	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Оценка	26.95	5.84	17.68	3.00	1.71	-5.06	9.71	13.35	0.78	9.63

Дисперсия	Степень свободы	Оценка	
$s^2_{ад}$	5	267.45	
$s^2_{восп}$	3	21.41	
Модель	F -эксп.	F -крит. (p =0.05)	Вывод
	12.49	9.0	модель адекватна

Особый интерес представляют графики полученной поверхности отклика, представленные на рисунке, определяемой уравнением (в кодированных значениях факторов):

$$y = 26.95 + 5.84x_1 + 17.68x_2 + 3x_3 + 1.71x_1x_2 - 5.06x_1x_3 + \\ +9.71x_2x_3 + 13.35x_1^2 + 0.78x_2^2 + 9.63x_3^2.$$

На каждом из трех графиков отсутствующий фактор зафиксирован на основном уровне (0.0).



Зависимость мутности воды (y в %) от дозы полиэлектролита (x_2), сульфата алюминия (x_1) и уровня pH (x_3) в кодированных значениях

Из рисунка хорошо видно, что мутность воды в значительной степени зависит от дозы полиэлектролита и в меньшей степени от уровня pH и дозы сульфата алюминия. Кроме того, мутность имеет минимум около

точки $(-0.3, 0, -0.2)$ на уровне около 25%. Результаты, полученные при помощи программы EOSuppport, хорошо согласуются с результатами исследователей, изложенными в [6].

Выводы. Программное средство EOSupport планируется в будущем расширить дополнительными возможностями, такими как поддержка ротатабельных планов, планов Бокса-Бенкена, функциями разбиения плана на блоки, вычисления p-значений для проверки гипотез и др. Наряду с улучшением средств визуализации полученных результатов всё это позволит существенно повысить эффективность применения EOSupppot.

Библиографический список

1. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В.Грановский. - М.: Наука, 1976.

2. *Ахназарова С.Л.* Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. / С.Л. Ахназарова, В.В.Кафаров. - М.: Высшая школа, 1978.

3. Leonard Lye, Teaching DOE with the DOE-Golfer, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University, St. John's, Newfoundland, Canada, http://www.statease.com/golftoy.html.

4. Planning for the unexpected, Scientific Computing World: February/ March 2006, http://www.scientific-computing.com.

5. Rajender Parsad, P. K. Batra, Response Surface Designs, Indian Agricultural Statistics Research Institute (I.A.S.R.I.), New Delhi, http://www.iasri.res.in/iasriwebsite/.

6. F. Rigas, P. Panteleos, C. Laoudis, Central Composite Design in a Refinery's Wastewater Treatment by Air Flotation, National Technical University of Athens, ECOTECH Ltd, Athens, Greece, 2000.

Материал поступил в редакцию 26.02.08.

V. V. VOLKOV

DESIGN OF EXPERIMENTS AND ANALYSIS OF THEIR RESULTS USING EOSUPPORT SOFTWARE

This article introduces a computer program EOSupport (Experimental Optimization Support) written by the author which helps to design experiments, process experimental data, calculate regression coefficients and compute statistical criterias for testing experimental results. The article also contains results of two successfully solved with EOSupport typical optimization problems.

ВОЛКОВ Виталий Витальевич (р.1984), аспирант (научный рук. Р.В.Нейдорф) первого года обучения кафедры «ПОВТ и АС» ДГТУ. Окончил ДГТУ по специальности «Программное обеспечение ВТ и АС» в 2007 году.
Область научных интересов: теория управления, планирование эксперимента, языки программирования, базы данных.
Автор 5 научных статей.

УДК 519.1

Н.Н. ВОДОЛАЗОВ

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОТОКА В СЕТЯХ С БАРЬЕРНОЙ ДОСТИЖИМОСТЬЮ

Рассматривается задача о нахождении максимального потока в сетях с барьерной достижимостью при помощи модифицированного алгоритма Эдмондса-Карпа. Особенность предложенного алгоритма в том, что он позволяет находить поток в сетях, для которых разработанный ранее алгоритм [1] не находил решения.
Ключевые слова: *сеть, источник, сток, поток, блокирующий поток.*

Введение. В классической постановке задачи стационарным потоком на графе $G(U,V,\varphi)$ называется отображение $f:U\to R^+$, удовлетворяющее условиям:

$$\begin{cases} \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)} f(u) = \sum\limits_{u\in\Theta_+(\upsilon)} f(u)\ , \quad \forall\upsilon\in V, \upsilon\neq s, \upsilon\neq t\ , \\ 0\le f(u)\le c(u)\ , \end{cases} \tag{1}$$

где $\Theta_-(\upsilon)$ – множество дуг, входящих в вершину υ; $\Theta_+(\upsilon)$ – множество дуг, выходящих из вершины υ; $c(u)$ – пропускная способность дуги; s – источник; t – сток.

Требуется максимизировать $\sum\limits_{u\in\Theta_-(s)} f(u)$.

Для решения этой задачи может быть применен симплекс-метод. Однако в 1956 г. Форд и Фалкерсон предложили более эффективный алгоритм решения задачи, основанный на поиске увеличивающих цепей из источника в сток. Эдмондс и Карп [2] в 1972 г. улучшили алгоритм Форда-Фалкерсона и получили алгоритм, время работы которого не зависело от пропускных способностей дуг.

Постановка задачи. Требуется найти максимальный поток в графе $G(U,V,\varphi)$ с дополнительным ограничением на пути частиц, которое в [1] названо барьерной достижимостью. Множество дуг графа U разбито на три непересекающихся подмножества: U_H (нейтральные дуги), U_+ (увеличивающие дуги) и $U_Б$ (барьерные дуги). С каждой частицей, проходящей по графу, связано целое число i - её барьерный уровень. Для частиц, выходящих из источника, он равен 0. Если барьерный уровень меньше некоторого заданного числа k, то при прохождении дуг из множества U_+ барьерный уровень увеличивается на 1, при прохождении дуг из множеств U_H и $U_Б$ барьерный уровень не изменяется. Частица может проходить по дугам множества $U_Б$ только в случае, если её барьерный уровень равен k.

Существующее решение. Решение описанной задачи предложено в [1]. Для этого по исходному графу строится вспомогательный граф. Каждой вершине x исходного графа ставится в соответствие $k+1$ вершина вспомогательного графа $x^{(0)},x^{(1)},...,x^{(k)}$. Каждой нейтральной дуге (x,y) исходного графа ставится в соответствие $k+1$ дуга вспомогательного графа вида $(x^{(i)},y^{(i)})$, $i=0,...,k$ (рис.1).

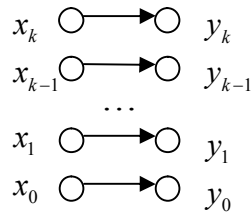


Рис.1. Преобразование нейтральных дуг

Каждой увеличивающей дуге исходного графа (x,y) ставится в соответствие $k+1$ дуга вспомогательного графа: k дуг вида $(x^{(i)},y^{(i+1)})$, $i=0,...,k-1$ и одна дуга $(x^{(k)},y^{(k)})$ (рис.2).

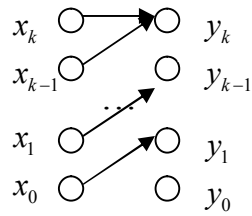


Рис.2. Преобразование увеличивающих дуг

Каждой барьерной дуге исходного графа ставится в соответствие одна дуга вспомогательного графа $(x^{(k)},y^{(k)})$ (рис.3).

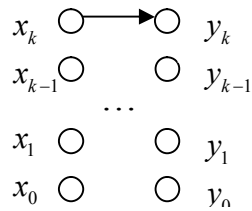


Рис.3. Преобразование барьерных дуг

В соответствии с идеей, изложенной в [1], пропускная способность дуг вспомогательного графа не определена. Вместо этого определен максимальный поток по множеству дуг вспомогательного графа, который поставлен в соответствие дуге исходного графа (множеству связанных дуг). Следовательно, применить алгоритм Форда-Фалкерсона мы не можем.

В работе [1] авторами был развит новый подход к построению алгоритма. Его сущность состоит в том, что алгоритм ищет кратчайший простой путь на вспомогательном графе из источника в сток, по которому

можно пустить увеличивающий поток. Поток увеличивается на некоторую величину, и пропускная способность множеств связанных дуг, через которые прошел увеличивающий путь, уменьшается на эту же величину. Таким образом, в отличие от алгоритма Форда-Фалкерсона алгоритм, описанный в [1], ищет не увеличивающую цепь, а увеличивающий путь. Ясно, что найденный поток будет неулучшаемым.

Приведенный ниже пример показывает, что неулучшаемый поток может быть не максимальным в случае, когда возможен блокирующий поток [3]. Блокирующий поток в [3] рассматривается как поток, для которого не существует увеличивающего пути из источника в сток. Надо сказать, в таких случаях (блокировки) алгоритм Форда-Фалкерсона находит выход, поскольку существует увеличивающая цепь. Рассмотрим пример.

Пример 1. Пусть дан граф G (рис.4).

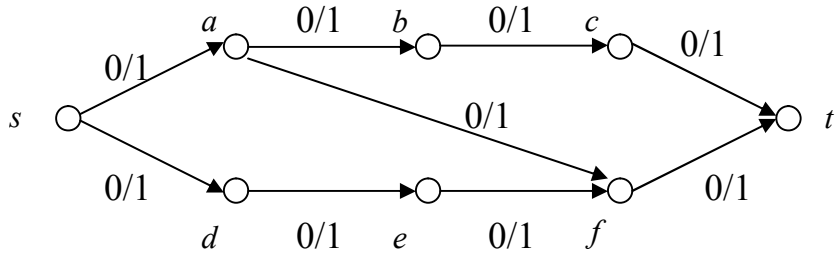


Рис.4. Нулевой поток на графе G

На рис. 4 источник – вершина s, сток – вершина t. Первая цифра в записи $0/1$ - поток по дуге, вторая – пропускная способность. Все дуги нейтральные и нет барьерных дуг, т.е. мы рассматриваем случай поиска потока в обычном графе. Тогда первый увеличивающий путь, найденный алгоритмом, будет проходить по вершинам s, a, f, t (рис.5).

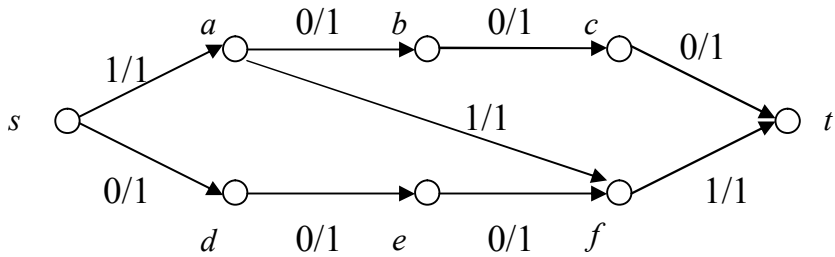


Рис.5. Блокирующий поток на графе G

Поток на рис. 5 – блокирующий, так как нет увеличивающего пути из источника в сток. Величина потока равна 1, максимальный поток, изображенный на рис. 6, равен 2.

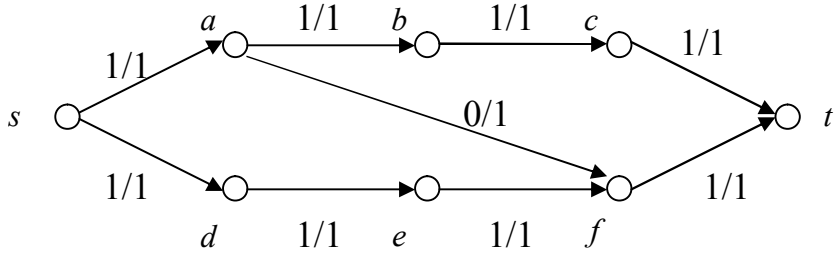


Рис.6. Максимальный поток на графе G

Таким образом алгоритм не находит максимальный поток для решения классической задачи. В случае с добавлением дополнительных ограничений на поток также возможно появление блокирующего потока.

Предлагаемый алгоритм решения задачи. Для удобства будем рассматривать не суммарный поток частиц всех барьерных уровней через дугу, а поток частиц каждого барьерного уровня через дугу. Поэтому для поставленной задачи полагаем, что поток – отображение $f : U \to (R^+)^{k+1}$, т.е. поток ставит каждой дуге в соответствие вектор чисел, при этом i-я компонента вектора является потоком i-го барьерного уровня по дуге. Обозначим $f_i(u,\upsilon)$ i-ю компоненту вектора потока по дуге (u,υ), а $f(u,\upsilon) = \sum_{i=0}^{k} f_i(u,\upsilon)$.

Условия (1) заменим на следующие условия:

$$\begin{cases} \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_H} f_0(u) = \sum\limits_{u\in\Theta_+(\upsilon)} f_0(u),\ \forall \upsilon \in V, \upsilon \neq s, \upsilon \neq t; \\ \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_H} f_i(u) + \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_+} f_{i-1}(u) = \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)} f_i(u),\ \forall i = 1,\ldots,k-1,\ \forall \upsilon \in V; \\ \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_H} f_k(u) + \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_+} f_{k-1}(u) + \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_+} f_k(u) + \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)\cap U_Б} f_k(u) = \sum\limits_{u\in\Theta_-(\upsilon)} f_k(u)\ \forall \upsilon \in V; \\ f_i(u) \geq 0,\ \forall i = 1,\ldots,k-1, \forall u \in U; \\ 0 \leq f(u) \leq c(u). \end{cases} \quad (2)$$

Требуется максимизировать $\sum\limits_{u\in\Theta_-(s)} f(u) - \sum\limits_{u\in\Theta_+(s)} f(u)$, т.е. вместо одного уравнения для каждой вершины в классическом случае, для данной задачи получается $k+1$ уравнение для каждой вершины. Следует подчеркнуть, что эту задачу так же, как и классическую, можно решать симплекс-методом, но мы попытаемся изменить алгоритм Эдмондса-Карпа так, чтобы с его помощью можно было решать задачу о максимальном потоке на графе с дополнительными ограничениями на пути частиц. Модифицировав алгоритм Форда-Фалкерсона, Эдмондс и Карп предложили производить увеличение потока по кратчайшей увеличивающей цепи (считая, что все дуги имеют единичную длину) [2].

Для решения поставленной задачи предполагается помечать каждую вершину вектором из $k+1$ метки, где k – максимальный барьерный

уровень; каждая метка содержит информацию об увеличивающей цепи соответствующего барьерного уровня в данную вершину. Наш алгоритм на первом этапе решения использует в своей работе очередь помеченных вершин и вспомогательный алгоритм пометки вершин.

Алгоритм пометки вершин

На входе помеченная вершина x графа G. Алгоритм помечает смежные вершины и добавляет их в очередь помеченных вершин.

1. Для каждой дуги (x,a) и (a,x).
2. Для каждой метки (b,c,d) i-го уровня вершины x.
   a. Если мы рассматриваем дугу (x,a):
      i. если $f(x,a) < C(x,a)$, то обозначим $e = \min(d, C(x,a) - f(x,a))$, $s =$"+", иначе переходим на шаг 2 и рассматриваем следующую метку.
   b. Если мы рассматриваем дугу (a,x):
      i. если $f_i(a,x) > 0$, то обозначим $e = \min(d, f_i(x,a))$, $s =$"–", иначе переходим на шаг 2 и рассматриваем следующую метку.
   c. Если (x,a) или (a,x) – нейтральная дуга и a не помечена на i-ом уровне, то:
      i. помечаем вершину a на i-ом уровне меткой (x,s,e);
      ii. если a не первая в очереди, то добавляем a в очередь помеченных вершин.
   d. Если (x,a) – увеличивающая дуга, $i < k$ и a не помечена на $(i+1)$-ом уровне, то:
      i. помечаем вершину a на $(i+1)$-ом уровне меткой (x,s,e);
      ii. если a не первая в очереди, то добавляем a в очередь помеченных вершин.
   e. Если (a,x) – увеличивающая дуга, $i > 0$ и a не помечена на $(i-1)$-ом уровне, то:
      i. помечаем вершину a на $(i-1)$-ом уровне меткой (x,s,e);
      ii. если a не первая в очереди, то добавляем a в очередь помеченных вершин.
   f. Если (x,a) или (a,x) – барьерная дуга, $i = k$ и a не помечена на k-ом уровне, то:
      i. помечаем вершину a на k-ом уровне меткой (x,s,e);
      ii. если a не первая в очереди, то добавляем a в очередь помеченных вершин.

Алгоритм поиска максимального потока

1. Поиск увеличивающей цепи.
   a. Помечаем источник вектором $\begin{pmatrix} (\sim,\sim,\infty) \\ --- \\ --- \\ \dots \\ --- \end{pmatrix}$, прочерк на i-ом месте означает, что вершина не помечена на данном барьерном уровне.
   b. Помещаем источник в очередь помеченных вершин.
   c. Пока очередь просмотренных вершин не пуста:
      i. выбираем одну вершину x из очереди;
      ii. выполняем для нее алгоритм пометки вершин, если сток оказался помечен, то найдена увеличивающая цепь, переходим к шагу 2, иначе переходим к шагу i;
      iii. если очередь просмотренных вершин пуста, то алгоритм завершает свою работу.
2. Поиск величины, на которую можно увеличить поток.
   a. Восстанавливаем увеличивающую цепь в сток по меткам. При этом цепь может проходить по некоторым дугам несколько раз, но на разных барьерных уровнях.
   b. Обозначим λ величину e из метки стока.
   c. Проходим по полученной цепи.
      i. Пусть l - количество проходов цепи по дуге, при котором направления цепи и дуги совпадают, p - количество проходов, при котором направления противоположны. Тогда, если $l > p$ и $\lambda > \frac{C(x,a) - f(x,a)}{l - p}$, то присвоим $\lambda = \frac{C(x,a) - f(x,a)}{l - p}$.
3. Увеличение потока. Проходим по всем дугам цепи:
   a. Если направление цепи из источника в сток совпадает с направлением дуги, то увеличиваем поток по дуге на величину λ.
   b. Если направление дуги не совпадает с направлением цепи из источника в сток, то уменьшаем поток по дуге на величину λ.

Отличие предлагаемого нами алгоритма от алгоритма Форда-Фалкерсона в том, что, во-первых, он работает с вектором меток, а во-вторых, требуется шаг 2 для определения максимального потока по цепи. Необходимость шага 2 вызвана тем, что увеличивающая цепь может проходить по дуге несколько раз на разных барьерных уровнях. Благодаря использованию очереди каждая увеличивающая цепь будет иметь минимальную длину.

Пример 2. Рассмотрим граф с источником s и стоком t (рис.7), пропускные способности всех дуг равны 1. Обозначим поток через дугу вектором, первая компонента которого – поток с нулевым барьерным уровнем, вторая – с первым.

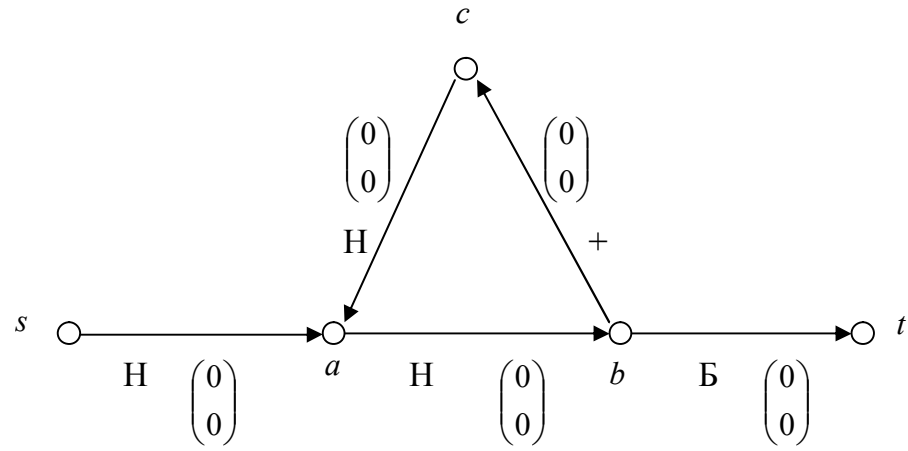


Рис.7. Начальное состояние графа

Дуга (b,t) – барьерная, с барьерным уровнем 1, дуга (b,c) – увеличивающая, остальные дуги нейтральные. Применим наш алгоритм.

После первого шага вершины окажутся помеченными так, как изображено на рис.8.

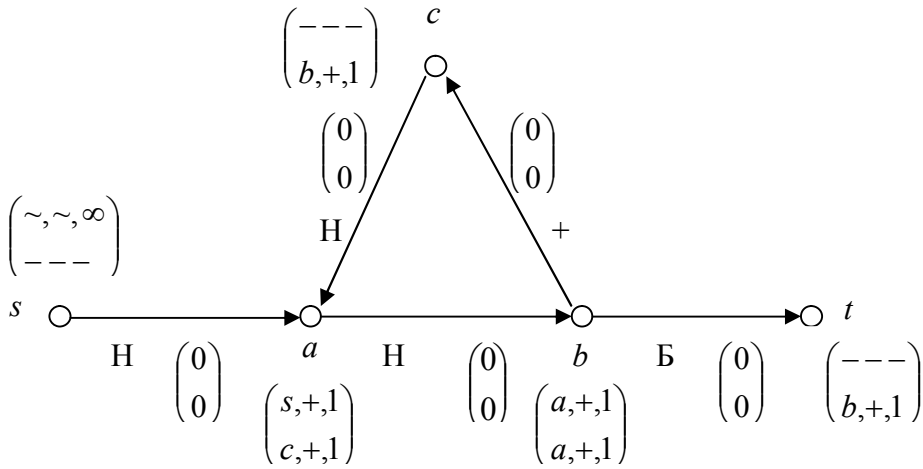


Рис. 8. Состояние графа после первого шага

Таким образом, найдена увеличивающая цепь из источника в сток, проходящая по вершинам s,a,b,c,a,b,t. При этом по дуге (a,b) цепь проходит дважды: сначала на первом барьерном уровне, затем на втором. Поэтому на втором шаге алгоритма величина, на которую по этой цепи можно увеличить поток, будет определена как $0{,}5$. После увеличения потока и повторения первого шага алгоритма граф будет выглядеть следующим образом (рис. 9).

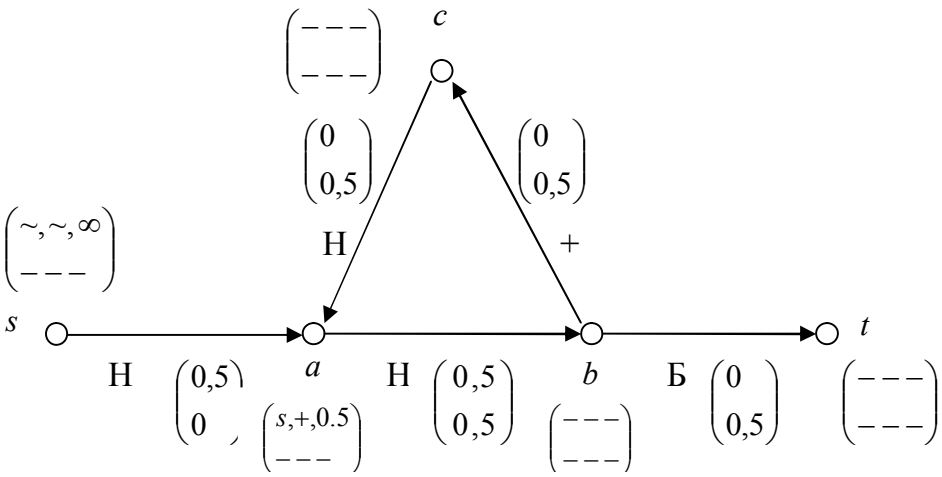


Рис. 9. Состояние графа, при котором алгоритм завершает работу

Суммарный поток по дуге (a,b) равен 1, и эта дуга насыщена. Вершина c не может быть помечена, так как вершина a помечена на нулевом уровне, а поток по дуге (c,a) идет по первому уровню. Пометка вершины c и построение через нее увеличивающей цепи означали бы нарушение условий (2). Сток не может быть помечен, и поэтому алгоритм заканчивает свою работу. На основе примера 2 поток, получаемый предложенным алгоритмом, совпадает с потоком, получаемым симплекс-методом для системы (3).

$$
\begin{cases}
f_0(s,a) \ge 0 \\
f_0(a,b) \ge 0 \\
f_1(a,b) \ge 0 \\
f_0(b,c) \ge 0 \\
f_1(b,c) \ge 0 \\
f_0(c,a) \ge 0 \\
f_1(c,a) \ge 0 \\
f_0(b,t) \ge 0 \\
f_1(b,t) \ge 0 \\
f_0(s,a) \le 1 \\
f_0(a,b) + f_1(a,b) \le 1 \\
f_0(b,c) + f_1(b,c) \le 1 \\
f_0(c,a) + f_1(c,a) \le 1 \\
f_0(b,t) + f_1(b,t) \le 1 \\
f_0(s,a) + f_0(c,a) = f_0(a,b) \\
f_1(c,a) = f_1(a,b) \\
f_0(a,b) = f_0(b,c) \\
f_1(a,b) = f_1(b,c) + f_1(b,t) \\
f_0(c,a) = 0 \\
f_0(b,c) + f_1(b,c) = f_1(c,a) \\
f_0(s,a) \to \max
\end{cases}
\qquad (3)
$$

Пример 3. Несмотря на то, что предлагаемый нами алгоритм может находить максимальный поток в сетях с возможной блокировкой, как в примере 1, существуют сети, для которых он не находит максимальное решение. В этом случае рассмотрим граф, изображенный на рис. 10.

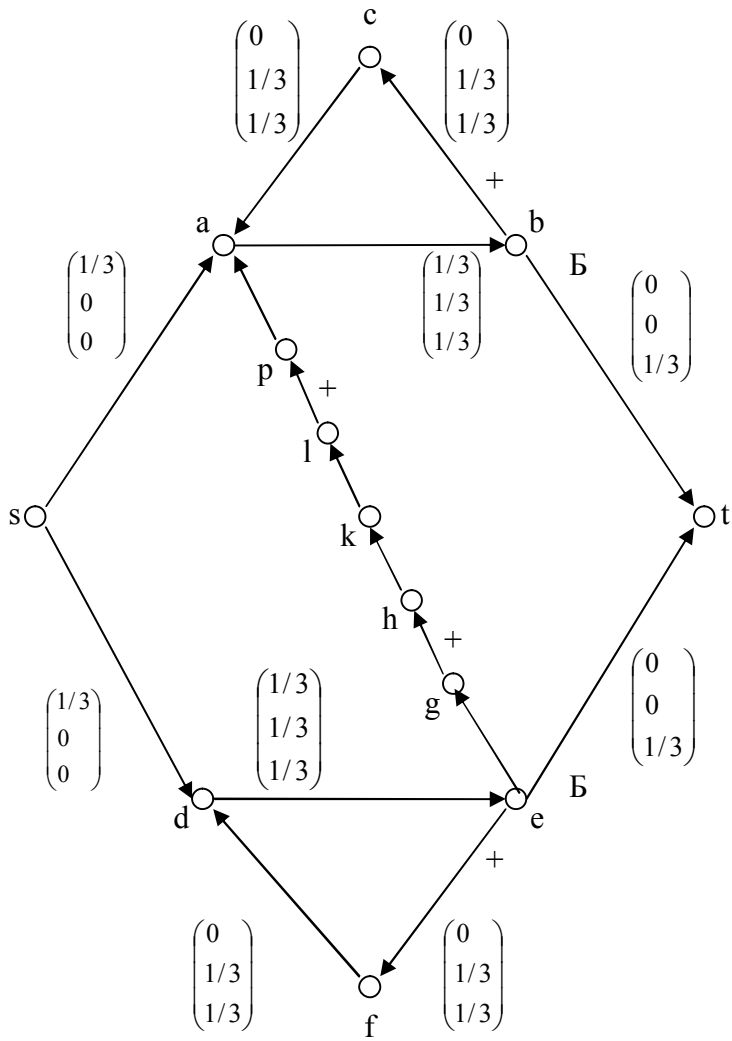


Рис.10. Граф с блокирующим потоком

Пропускные способности всех дуг равны 1. Дуги (b,c), (e,f), (g,h) и (l,p) - увеличивающие, (b,t) и (e,t) - барьерные, с барьерным уровнем 2, остальные дуги нейтральные. Поток по не помеченным на рис.10 дугам считаем равным 0, общий поток на рис.10 равен $\frac{2}{3}$.

Установлено, что найденный симплекс-методом максимальный поток, равен 1. Поток образуется, если все дуги пути, проходящего по вершинам s,d,e,g,h,k,l,p,a,b,t, насыщены, а остальные дуги не нагружены. Так как на рис. 10 дуги (d,e) и (a,b) насыщены, а (c,a), (f,d) и (p,a) не нагружены на нулевом барьерном уровне, то не существует не только

увеличивающего пути, но и увеличивающей цепи из источника в сток. Следовательно, предложенный алгоритм не может найти максимальный поток на этом графе.

Выводы. Предложенный нами алгоритм основан на идее Форда-Фалкерсона нахождения увеличивающих цепей. Ранее нами было показано, что для поставленной задачи с барьерными ограничениями существуют блокирующие потоки – потоки, которые не максимальны, но для них не существует увеличивающей цепи. Из примера 3 видно, что алгоритм, основанный на поиске увеличивающей цепи, не может найти максимальный поток в сети на рис. 10. Отличие данной блокировки от блокировки, рассмотренной в [2], состоит в том, что блокировка в [2] представлена как отсутствие увеличивающего пути на графе без дополнительных ограничений на пути частиц. Тем не менее, решать эту задачу возможно, применяя симплекс-метод к системе уравнений и ограничений (2).

Автор выражает благодарность профессору Я.М.Ерусалимскому за постановку задачи.

Библиографический список

1. *Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А.* Потоки в сетях со связанными дугами./ Я.М.Ерусалимский, В.А.Скороходов. // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки, 2003; прил. № 8. – С. 9-12.

2. Edmonds Jack, Karp Richard M. Theoretical Improvements in Algorithmic Efficiency for Network Flow Problems.//Journal of the Association for Computing Machinery. - Vol. 19. – No. 2, April 1972, –P. 248-264.

3. Ning Xuanxi, Ning Angelika The Blocking Flow Theory and its Application to Hamiltonian Graph Problems. Germany,Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2006. –249p.

Материал поступил в редакцию 17.05.08.

N.N. VODOLAZOV

ON THE FLOW PECULIARITY IN NETWORK WITH BARRIER REACHABILITY

The problem of finding maximal flow in networks with barrier reachability is considered. It is shown that existing algorithm for solution this problem can't find solution for all networks. New algorithm is suggested.

ВОДОЛАЗОВ Николай Николаевич (р. 1984), аспирант первого года обучения факультета математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета. Окончил ЮФУ (2006), магистратуру (2007).
Научные интересы: теория графов и её приложения.

ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

УДК 631.362.36:633.1

Н.С. ДОНЦОВ, Н.П. ПОГОРЕЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА В ПНЕВМОКАНАЛЕ МАШИНЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ (МПО)

Приведены результаты экспериментальных исследований с оценкой влияния влажности на основные показатели процесса сепарации зернового вороха в пневмоканале машины предварительной очистки (МПО) зернового материала.

Ключевые слова: *процесс пневмосепарации, зерновой ворох, машина предварительной очистки, рациональные параметры.*

Цель исследований - оценить влияние влажности на показатели процесса сепарации зернового вороха в пневмоканале МПО.

Введение. В системах, формирующих отделения очистки зерноочистительных агрегатов в зонах сухого земледелия, используются машины МПО-50 и МПО-100 К527. Основная задача машин этого класса - предварительная очистка зернового вороха в соответствии с агротехническими требованиями. Анализ условий функционирования МПО показал, что на Юге России (Ростовская область) уборка производится часто в условиях повышенной влажности. В связи с этим исследование пневмосепараторов МПО в данных условиях – задача несомненно актуальная.

Методика эксперимента. В качестве объекта исследования был принят пнесмосепаратор машины МПО-100. Для определения влияния влажности зернового вороха на показатели процесса сепарации провели дополнительный эксперимент, используя полученные рациональные параметры устройства [1]. Исходный зерновой ворох содержал 84% зерна пшеницы "Безостая-1", 3% половы, 1% дробленой соломы длиной 20-60 мм, 3% сора мелкого, 3% семян сорняков, 3% дробленого зерна, 3% щуплого зерна. Перед экспериментом зерновой ворох искусственно увлажняли и по мере его высыхания проводили исследования в соответствии с методикой, которая заключалась в следующем.

Для каждой фиксированной подачи: Q_4=14,81 кг/(с.м), Q_2=18,52 кг/(с.м), Q_3=22,22 кг/(с.м) и влажности W=9,5-24,55% предварительно экспериментально определяли максимальную скорость воздушного потока в верхнем (0,26х0,4) м и нижнем (0,22х0,4) м сечениях канала (рис.1) с учетом скорости витания, при которой потери зерна в отходы не превышали допустимой величины, и для этой скорости воздушного потока находили показатели процесса сепарации.

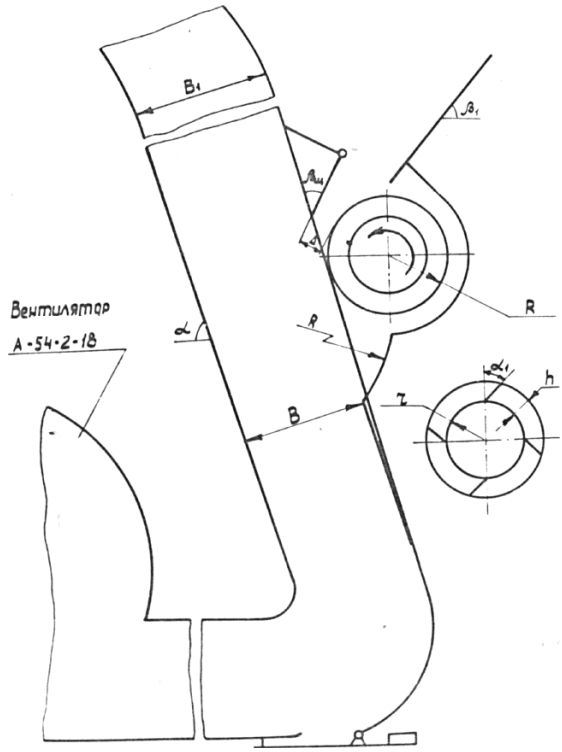


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Повторность опытов трехкратная. Влажность определяли по ГОСТ 21041-82. Результаты исследований сведены в табл.1 и представлены на рис.2.

Таблица 1

Зависимость показателей процесса сепарации зернового вороха пневмосепаратором МПО от влажности

№	Показатели, определяющие условия сепарации		Показатели процесса сепарации, %					
	Подача Q, кг/(с.м)	Влажность W, %	Потери зерна δ	Полнота выделения зерновых примесей $\varepsilon_{зп}$	Полнота выделения семян сорняков $\varepsilon_{сс}$	Полнота выделения половы $\varepsilon_{п}$	Полнота выделения соломы $\varepsilon_{с}$	Полнота выделения всех сорных примесей $\varepsilon_{в\Sigma с}$
1	14,81	9,33	0,0365	14,235	14,61	96,940	51,915	58,040
2	14,81	13,55	0,0100	13,730	16,25	85,845	57,640	43,395
3	14,81	16,82	0,0060	15,605	15,995	88,970	94,950	42,115
4	14,81	21,51	0,0150	18,810	21,905	70,850	91,540	39,725
5	14,81	24,55	0,0250	25,230	44,370	81,100	72,190	46,795
6	18,52	9,33	0,0405	16,010	27,805	96,105	38,365	75,505
7	18,52	13,55	0,0045	10,120	25,195	78,730	55,970	49,160
8	18,52	16,82	0,0100	10,420	19,455	78,805	55,170	49,200
9	18,52	21,51	0,0250	12,255	19,030	67,945	46,715	43,435
10	18,52	24,55	0,0115	10,680	11,930	70,540	57,140	46,095
11	22,22	9,33	0,0705	6,410	7,200	92,205	38,795	65,425
12	22,22	13,55	0,0100	13,685	16,160	77,195	23,520	39,025
13	22,22	16,82	0,0055	11,550	18,050	63,390	45,300	37,950
14	22,22	21,51	0,0150	14,175	13,430	71,110	48,270	38,490
15	22,22	24,55	0,0150	9,990	14,845	74,220	21,110	39,755

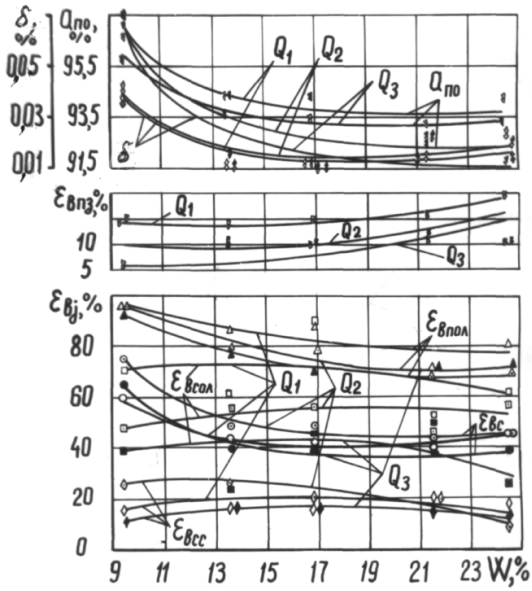


Рис.2. Зависимость показателей процесса сепарации зернового вороха пневмосепаратором МПО от влажности: Q – подача зернового вороха; $\varepsilon_{в\Sigma c}$ – полнота выделения всех сорных примесей из зернового материала; $\varepsilon_{вj}$ – полнота выделения i-го компонента из зернового материала; $a_{по,\delta}$ – чистота и потери полноценного зерна; W – влажность зернового вороха

Используя полученные данные, построили математические модели второго порядка, описывающие зависимость процесса сепарации зернового вороха от влажности. Найденные коэффициенты регрессии сведены в табл.2.

Таблица 2

Уравнения регрессии, описывающие процесс сепарации зернового вороха пневмоканалом МПО

№	Показатели, описывающие процесс пневмосепарации	Коэффициенты регрессии						Остаточная дисперсия	Совокупный коэффициент корреляции
		b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}		
1	Потери зерна δ	0,12341	0,001131	0,012101	0,000309	0,000191	0,000482	0,000108	0,850048
2	Полнота выделения зерновых примесей $\varepsilon_{зп}$	67,1312	6,252474	0,973676	0,063599	0,174812	0,012856	15,852899	0,678864
3	Полнота выделения семян сорников $\varepsilon_{сс}$	75,4986	8,725693	2,613147	0,180482	0,183676	0,031437	86,898902	0,527150
4	Полнота выделения половы $\varepsilon_{п}$	218,391	6,252769	7,544444	0,024051	0,124639	0,169496	75,768193	0,760572
5	Полнота выделения соломы $\varepsilon_{с}$	72,2079	10,52065	14,54803	0,298778	0,282453	0,241248	209,58177	0,811372
6	Полнота выделения всех сорных примесей из зернового материала $\varepsilon_{в\Sigma c}$	75,0329	21,93148	8,199280	0,090491	0,556658	0,252805	34,716753	0,884087

Регрессионные уравнения (см. табл.2) процесса сепарации зернового вороха пневмосепаратором МПО в зависимости от влажности получены в виде полиномов второй степени

$$\varepsilon_i = b_0 + b_1 Q + b_2 W + b_{12} QW + b_{11} Q^2 + b_{22} W^2 . \qquad (1)$$

Анализ результатов показал, что полнота выделения из зернового материала всех сорных примесей $\varepsilon_{в\Sigma с}$ при изменении влажности 9-17% снижается, например, для Q = 18,52 кг/(с.м) – с 75 до 50% (см. рис.2). Дальнейшее же увеличение влажности не оказывает существенного влияния на этот показатель. Аналогичная закономерность прослеживается и при анализе полноты выделения половы ($\varepsilon_{пол.}$) и дробленой соломы ($\varepsilon_{сол.}$) (см. рис.2).

Выводы. Обобщая проведенные исследования, следует отметить, что ускоренный ввод зернового вороха в пневмоканал лопастным битером обеспечивает устойчивое протекание пневмоинерционной сепарации при влажности до 17% и подаче 18,52 кг/(с.м), обеспечивая полноту выделения всех сорных примесей из зернового материала более 50%, что соответствует агротехническим требованиям.

Библиографический список.

1. *Ермольев Ю.И.* Моделирование технологического процесса пневмосепаратора с битерным устройством для ввода зернового материала / Ю.И. Ермольев, Н.С.Донцов Н.С. // Проектирование рабочих органов почвообрабатывающих уборочных сельскохозяйственных машин и агрегатов для кормопроизводства: межвуз. сб. науч. ст. – Ростов н/Д. – 1985. - С.116-121.

Материал поступил в редакцию 7.03.08.

N.S. DONTSOV, N.P. POGORELOV

RESEARCH INFLUENCE OF HUMIDITY ON PARAMETERS OF PROCESS SEPARATION GRAIN LOTS IN THE PNEUMOCHANNEL OF THE MACHINE PRELIMINARY CLEARING

Outcomes examinations with an estimation effect of damp on the basic indexes of process separation grain lots in the pneumocanal of the machine prestress clearing (MPS) of a grain material are reduced.

ДОНЦОВ Николай Сергеевич (р. 1953), доцент кафедры «Сервис и техническая эксплуатация автотранспортных средств» ДГТУ, кандидат технических наук (1989). Окончил РИСХМ (1978).
Область научных интересов – разработка и обоснование рациональных параметров машин предварительной очистки зерновых материалов.
Автор 63 научных работ.

ПОГОРЕЛОВ Николай Петрович (р. 1946), доцент кафедры «Сервис и техническая эксплуатация автотранспортных средств» ДГТУ, кандидат технических наук (1978). Окончил РИСХМ (1974).
Область научных интересов – моделирование и обоснование параметров динамики привода сельскохозяйственных машин.
Автор 60 научных работ.

УДК:631.3 - 351

С.А.ПАРТКО

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ УБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Анализируется использование вероятностных критериев при расчете оптимальности колебательных параметров мобильных сельхозмашин. Приводится пример.
Ключевые слова: *целевая функция, квантиль, вероятность.*

Уборочный комбайн должен выполнять технологический процесс уборки при минимальных потерях урожая, обеспечивать плавность хода машины для создания комфортных условий труда механизатора, при этом затраты энергии на передвижение машины должны быть минимальными.

При оптимизации колебательных параметров таких мобильных сельскохозяйственных зерноуборочных и силосоуборочных комбайнов и тракторов и используются интегральные критерии [1-6], критерии эффективности [2], а также вероятностные критерии [3].

Рассеивание колебательных параметров машин и условий эксплуатации привело к необходимости рассмотрения критериев оптимальности ходовой системы комбайна в вероятностном аспекте и представить критерий оптимальности в виде минимумов для вероятностей:

$$\begin{aligned} P\{D_R > [D_R]\} &= \min; \\ P\{D_{\ddot{Z}} > [D_{\ddot{Z}}]\} &= \min; \\ P\{D_\varphi > [D_\varphi]\} &= \min . \end{aligned} \qquad (1)$$

Здесь $D_{\ddot{Z}} = \sum^{r} \sigma^2_{Ri}$ - целевая функция плавности хода, или дисперсия вертикальных ускорений корпуса молотилки; $D_\varphi = \sum^{r} c^2_{\varphi i} \varepsilon_i^2$ - целевая функция энергетики, или дисперсия крутящего момента в приводе ходовой системы; $D_R = \sum^{r} \sigma^2_{Ri}$ - целевая функция агротехники, или дисперсия нагрузок на башмаках жатки; $[D_R], [D_{\ddot{Z}}], [D_\varphi]$ - допустимые значения целевых функций.

Общий критерий оптимальности имеет вид:

$$P\{D_R > [D_R]; \quad D_{\ddot{Z}} > [D_{\ddot{Z}}], D_\varphi > [D_\varphi]\} = \min . \qquad (2)$$

Для решения задачи локального оптимума представим целевую функцию плавности хода, например, в виде элементарной случайной функции, представляющей собой произведение неслучайной функции $\overline{D}_{\ddot{Z}}$ на случайную величину ε:

$$D_{\ddot{Z}} = \overline{D}_{\ddot{Z}} \cdot \varepsilon, \qquad (3)$$

где $\overline{D}_{\ddot{Z}}$ - математическое ожидание целевой функции; $\varepsilon = 1 + u_P V_{\ddot{Z}}$ - нормально распределенная случайная величина, имеющая среднее значение, равное единице, и коэффициент вариации, равный $V_{\ddot{Z}}$ (вертикальных ускорений молотилки).

Параметры статистических распределений вертикальных ускорений зерноуборочных комбайнов и самоходных шасси приведены в [3], по этим распределениям и допускаемому значению целевой функции определяли квантиль нормального распределения

$$u_P = \frac{1}{V_{\ddot{Z}}}\left\{\frac{\left[D_{\ddot{Z}}\right]}{\overline{D}_{\ddot{Z}}} - 1\right\}, \qquad (4)$$

и задача оптимизации была представлена в виде выбора колебательных параметров молотилки, при которых $u_P = \max$.

По известным таблицам [4] находили вероятность $P(u_P = \max)$, что соответствует выполнению условия

$$P\left\{D_{\ddot{Z}} > \left[D_{\ddot{Z}}\right]\right\} = \min . \qquad (5)$$

Рассмотрим примеры использования вероятностных критериев при расчетах оптимальности колебательных параметров ходовых систем комбайнов ДОН - 1500.

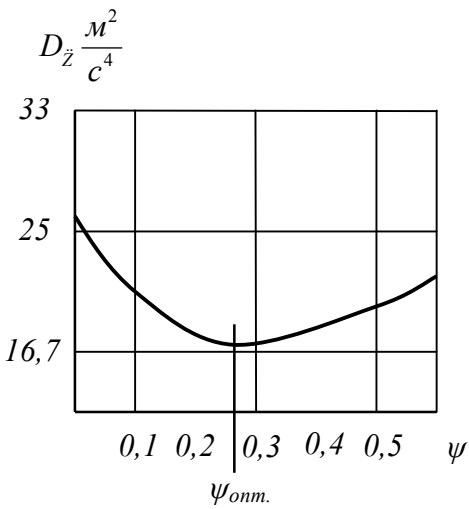


Рис.1. График целевой функции

На рис.1 представлен график целевой функции $D_{\ddot{Z}}$ для молотилки комбайна при работе машины в транспортном режиме. Оптимизируемым параметром здесь является относительный коэффициент затухания вертикальных колебаний молотилки ψ, обусловленных потерей энергии колебаний в шинах ходовых колес. На графике отмечено значение $\psi_{опт.}$ Задаемся теперь $\left[D_{\ddot{Z}}\right] = 4\,м^2/см^4$ из условия $\ddot{Z}_{\max} \le 0{,}2q$ согласно санитарных норм для операторов на ограничение вибраций на рабочем месте механизатора и перейдем к вероятностному критерию (5). Из графика (рис.2) помимо значений $\psi_{опт.}$ было установлено, что вероятность превышения заданного уровня вибрации $1 - (u_P = \max) = 0{,}38$. Поэтому оптимизация только по ψ является неэффективной, так как в данном случае при $\psi = \psi_{опт.}$ у 38% из всего парка ма-

шин $D_{\ddot{Z}} > \left[D_{\ddot{Z}}\right]$, что по условию равно $\ddot{Z}_{\max} > q$ и не соответствует условию на ограничение вибраций рабочего места машины.

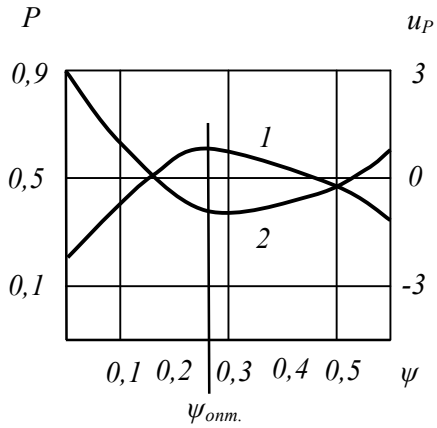


Рис.2. К определению локального оптимума: 1 - квантиль u_P; 2 – вероятность $1 - P(u_P)$

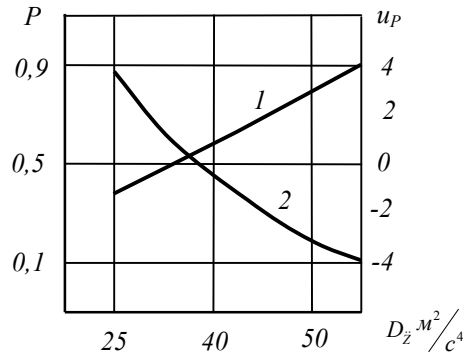


Рис.3. К определению локального оптимума с ограничениями: 1 – квантиль u_P; 2 – вероятность $1 - P(u_P)$.

На рис.3 представлены результаты расчетов, связанные с оптимизацией жесткости шин ходовых колес комбайна. В этом случае имеет место задача нахождения локального оптимума с ограничениями.

Выводы. Использование вероятностного критерия оптимизации для такой задачи позволило установить, что при снижении жесткости шин ходовых колес на *5·10³ Н/м* вероятность превышения $D_{\ddot{Z}}$ снижается от $1 - P(u_P) = 0{,}0338$ до $1 - P(u_P) = 0{,}1$. Таким образом, вероятность нарушения требований ISO существенно уменьшается.

Библиографический список

1. *Гриньков Ю.В.* Динамика процесса копирования рельефа поля жаткой зерноуборочного комбайна. / Ю.В. Гриньков, В.П.Жаров, В.А.Фокин, В.П.Землянухин. // Динамика узлов и агрегатов сельхоз.-машин: Сб. ст. – Ростов н/Д., 1983.

2. *Анилович В.Я.* Статическая теория подрессоривания машино - тракторных агрегатов: автореф. дис… д-ра наук. – М., 1967.

3. *Грошев Л.М.* Гидромеханический привод в агропромышленном комплексе: учеб. пособие. / Л.М.Грошев, А.Д.Дъяченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006.

4. *Смирнов Н.В.* Курс теории вероятности и математической статистики. / Н.В.Смирнов, И.В.Думин-Барковский. – М.: Наука, 1965.

5. *Гриньков Ю.В.* Основные принципы инженерного расчета упругих колебаний конструкций зерноуборочных комбайнов: дис… д-ра наук. - Волгоград, 1971.

6. *Грошев Л.М.* О представлении критериев оптимальности динамических систем в вероятностном аспекте: тр. совещ. «Проблемы оптимизации в машиностроении». / Л.М. Грошев. - Харьков, 1982.

Материал поступил в редакцию 17.03.08.

S.A.PARTKO

VIBRATORY PARAMETERS OPTIMIZATION OF HARVESTER`S RUNNING GEAR SYSTEM.

The article gives the analysis of possible criteria of application when accounting vibratory parameters mobile agricultural machines optimization. The example is given.

ПАРТКО Светлана Анатольевна, ассистент и соискатель кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета. Окончила ДГТУ в 1995 г.
Область научных интересов: динамика машин.
Имеет 2 научные публикации.

УДК 007:631.2

В.П. ДИМИТРОВ, Л.В. БОРИСОВА

О ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ КОМБАЙНА

Произведено аксиоматическое описание рассматриваемой задачи. Рассмотрены этапы формализации нечетких экспертных знаний.
Ключевые слова: *технологическая регулировка, нечеткие множества, лингвистическая переменная, функция принадлежности.*

Введение. Одним из подходов к решению проблемы повышения эффективности использования уборочных машин является применение информационных интеллектуальных систем, позволяющих снизить информационную нагрузку на оператора и, как следствие, повысить сменную производительность человеко-машинных систем. Для синтеза алгоритмов управления технологическим процессом комбайновой уборки становится очевидной необходимость построения формализованной теории, которая по своей структуре представляла бы не систему осмысленных разрозненных предложений (эмпирических экспертных знаний), а строгий формальный аппарат [1].Формализация задачи технологической регулировки сложной сельскохозяйственной машины должна начинаться с определения первичных терминов, из которых затем посредством правил построения создаются формулы, истинность или ложность которых определяются с помощью исходных формул и правил вывода. Исходные формулы выделяются из неформальных (существующих) теорий (в данном случае экспертных знаний конструкторов и эксплуатационников, а также в результате изучения взаимодействий рассматриваемых признаков).

Таким образом, для создания теории принятия решений по технологической регулировке машины необходимо сформулировать требуемые утверждения и понятия, раскрыть их формальные структуры. Для синтеза знаний необходимо выбрать математический аппарат описания утверждений, понятий и процесса их получения, предварительно определив предметы описания и методики их построения.

Аксиоматика. Для успешного применения различных математических методов следует предварительно построить модель реальной системы и определить в ней интересующие нас с математической точки зрения процессы технологической регулировки. Эта модель должна быть достаточно абстрактной, чтобы ее можно было использовать для различных машин (технических систем). Поэтому на начальном этапе анализа мы задаемся следующими общими определениями.

Определение 1. Под системой будем понимать соединение N элементов единого целевого назначения, которое преобразует входные потоки в выходные потоки. Система будет считаться нормально функционирующей, если указанное преобразование обеспечивает нахождение в допусковых пределах характеристик выходных потоков. В противном случае система считается неправильно функционирующей.

Определение 2. Поведение выходного параметра любого i-го элемента может быть описано случайной функцией $\xi_i(t)$. Будем считать, что

элемент обладает заданным качеством, если его выходной параметр (параметры) находится в пределах нижней и верхней границ допуска $[C_i^H,\ C_i^B]$. Границы допуска в общем случае могут изменяться во времени $C_i^H = C_i^H(t)$, $C_i^B = C_i^B(t)$; в частном случае $C_i^H = const,\ C_i^B = const$.

Определение 3. Выход показателя процесса $\xi_i(t)$ за установленные границы допуска $[C_i^H,\ C_i^B]$ можно классифицировать как потерю элементом заданного качества – технологический или технический отказ элемента (который характеризуется внешним признаком нарушения технологического процесса или внешним признаком неисправности с конкретными временными и пространственными атрибутами).

Предположение 1. Предположим (если нет особых условий), что в системе одновременно может быть появление только одного внешнего признака нарушения технологического процесса, т.е. выхода за допусковые пределы значений выходного параметра.

Предположение 2. Предположим, что в системе одновременно может быть только один неисправный элемент (блок). Неисправность системы в целом вызывается неисправностью любого одного элемента (блока), и что проверка системы не вносит в нее новых неисправностей.

Определение 4. В системе возможно осуществление определенного числа проверок $\Pi = \{\pi_j\},\ \ j = \overline{1,k}$, каждая из которых имеет свою стоимость, охватывает (проверяет) определенное подмножество элементов системы и может иметь два исхода: положительный и отрицательный.

Проверка считается положительной, если при ее проведении значения выходных параметров попадают в допусковый предел.

Проверка считается отрицательной, если после ее проведения значение выходного параметра остается за допусковыми пределами.

Предположение 3. Для предметной области «технологическая регулировка» (в отличие от «поиска неисправностей») целесообразно ввести понятие стирание информации от проверки. Однако бывает, что помехи от проверяемой или проверяющей системы или от внешней среды (изменение значений факторов среды) не дают возможности сразу однозначно зафиксировать результат проверки. В таком случае проверку приходится повторять несколько раз.

Определение 5. Будем говорить, что пространство возможных проверок (регулировок) П не является ограниченным, если оно включает в себя все возможные 2^N-1 комбинации проверяемых элементов. На практике пространство П бывает ограниченно, обычно число возможных проверок не намного превышает число элементов в подсистеме.

Определение 6. Стоимость проверки (регулировки отдельного параметра) является некоторой функцией от времени проведения проверки, стоимости используемых при этом контрольно-измерительных средств, квалификации оператора, производящего проверку. В первом приближении эту зависимость можно аппроксимировать линейной функцией.

Определение 7. Проверки $\pi_j \in \Pi$ и $\pi_k \in \Pi$, $k \neq j$ будем называть непересекающимися (независимыми), если подмножества элементов, проверяемые соответственно проверками π_j и π_k, не пересекаются.

Предположение 4. Будем полагать, что для рассматриваемой системы всегда задано некоторое априорное распределение значимости (весомости) вклада технических параметров системы в возможность появления внешнего признака нарушения качества технологического процесса.

Описание предметной области. Многообразие внешних условий функционирования уборочной техники вынуждают конструкторов предусматривать регулировки рабочих органов. Для того чтобы обеспечить выполнение технологического процесса в различных условиях с высоким качеством необходима технологическая регулировка машин.

При использовании уборочных машин информация о процентном соотношении потоков основного продукта и примесей является основой для принятия решений по регулировке машины. Сказанное выше позволяет ввести в рассмотрение структуру комплекса технологических показателей процесса уборки сельскохозяйственных культур (рис.1).

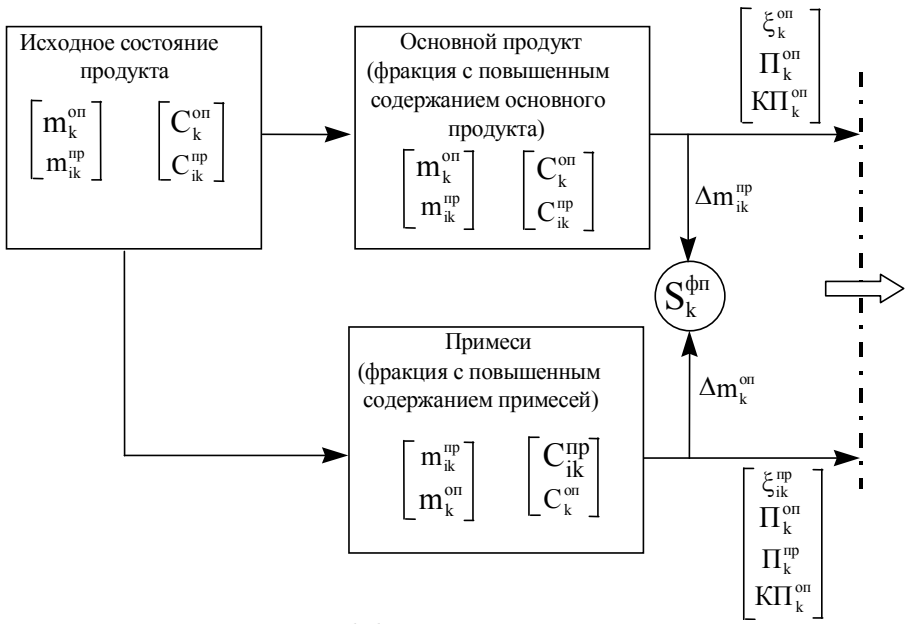


Рис.1. Обобщенная структура комплекса технологических показателей процесса уборки

На рис.1 приняты обозначения: Z_{k-1} - (k-1)-й этап преобразования «исходной массы» (влияние рабочего органа); m_k^{on} - масса основного продукта на k-й стадии фракционирования (воздействия рабочего органа); m_{ik}^{np} - масса i-го компонента примесей; $ОП$ - основной продукт; $Пр_i$ - i-й компонент примесей; C_k^{on} - состояние основного продукта на k-й стадии

фракционирования; $C_{ik}^{пр}$ - состояние i-го компонента примесей на k-й стадии фракционирования; $S_k^{фп}$ - k-й межфракционный переход (выделение части примесей из потока основного продукта либо выделение части основного продукта из потока примесей); $П_k^{оп}$ - прямые потери основного продукта на k-й стадии фракционирования (потери зерна, клубней, части корня с коронкой, части стебля льна и др.); $КП_k^{оп}$ - косвенные потери основного продукта на k-й стадии фракционирования (дробление зерна, микроповреждения зерна, клубней, корней и др.); $П_k^{пр}$ - потери примесей на k-й стадии фракционирования (в случае, если эта часть «исходного продукта» идет на корм животным и может рассматриваться как второстепенный «основной продукт»); ξ - показатель, характеризующий отношение масс продукта на различных стадиях разделения:

$$\xi_k^{ОП} = \frac{m_k^{ОП}}{m_{k\text{-}1}^{ОП}}; \qquad \xi_{\text{ik}}^{\text{ПР}} = \frac{m_{\text{i,k}}^{\text{ПР}}}{m_{\text{i,k-1}}^{\text{ПР}}}.$$

Для последовательности из нескольких рабочих органов, воздействующих на потоки «основного продукта» и «примесей», справедливы соотношения:

для «основного продукта»:

доля (md) «основного продукта» растет $md_к^{ОП} > md_{к-1}^{ОП} > md_{к-2}^{ОП} > \ldots$,

а доля примесей падает $md_к^{ПР} < md_{к-1}^{ПР} < md_{к-2}^{ПР} < \ldots$,

причем $md_к^{ПР} < \left[md^{ПР}\right]$, где $\left[md^{ПР}\right]$ – допустимое содержание примесей в основном продукте в соответствии с целью уборки;

для «примесей»:

доля (md) «примесей» растет $md_к^{ПР} > md_{к-1}^{ПР} > md_{к-2}^{ПР} > \ldots$,

а доля основного продукта падает $md_к^{ОП} < md_{к-1}^{ОП} < md_{к-2}^{ОП} < \ldots$,

причем $md_к^{ОП} < \left[md_{п.сум.}^{ОП}\right]$, где $\left[md_{п.сум.}^{ОП}\right]$ – допустимые суммарные потери основного продукта.

Для технологических показателей степени разделения потоков при наличии потерь как основного продукта, так и примесей характерно соотношение:

$$m_k^{ОП} + m_k^{ПР} + П_k^{ОП} + П_k^{ПР} = 1.$$

В случае последовательного разделения на фракции, когда (k-1)-я фракция является «исходной массой» для к-го разделения, процесс может рассматриваться аналитически как преобразование точки $S_{к\text{-}1}(m+1)$-мерного пространства $S_{k\text{-}1}^{ОП}\left[m_{k\text{-}1}^{ОП}; П_{k\text{-}1}^{ОП}; \ldots\right]$ в две другие точки:

$$S_k^{ОП}\left[m_k^{ОП}; П_k^{ОП}; \ldots\right], \qquad S_k^{ПР}\left[m_{ik}^{ОП}; П_{ik}^{ОП}; m_{ik}^{ПР} \ldots\right]$$

посредством оператора

$$m_k^{ОП} = \Phi\left(Z_k, C_k^{ОП}, C_{ik}^{ПР}\right).$$

Процесс k-го разделения потока характеризуется изменением состояния основного продукта, а также ik-й компоненты примесей под воздействием рабочего органа. Так при обмолоте хлебной массы в МСУ комбайна в зависимости от состояния хлебной массы и значений параметров МСУ можно наблюдать различное содержание крупных фракций соломы в зерновом (мелком) ворохе.

Таким образом, переход исходного продукта из одного состояния в другое под действием рабочих органов уборочной машины можно охарактеризовать как реализацию операций фракционирования. В этом случае функционирование системы можно представить как процесс изменения ее состояний. Пусть z_t - состояние изучаемой системы в момент t. При этом $z_t \in Z$, где Z - множество всех возможных состояний системы, которое определяет множество состояний. В общем случае z_t есть n-мерный вектор [4]

$$z_t = \| z_{1t}, z_{2t} \ldots, z_{nt} \|.$$

Состояние системы обусловливается влиянием всей совокупности управляющих воздействий (в том числе и со стороны ЛПР) к моменту времени t, а также влиянием внешних факторов, часть из которых Λ_E имеет стохастический характер, а другая часть может быть отнесена к природным и поведенческим неопределенностям (например, потеря внимания, забывчивость и т.п.).

На рис.2 схематично представлено информационное «поле» признаков предметной области (множества входных значений факторов внешней среды, регулируемых параметров машины и показателей качества работы), которые обусловливают суть задач предварительной настройки и корректировки технологических регулировок на примере зерноуборочного комбайна

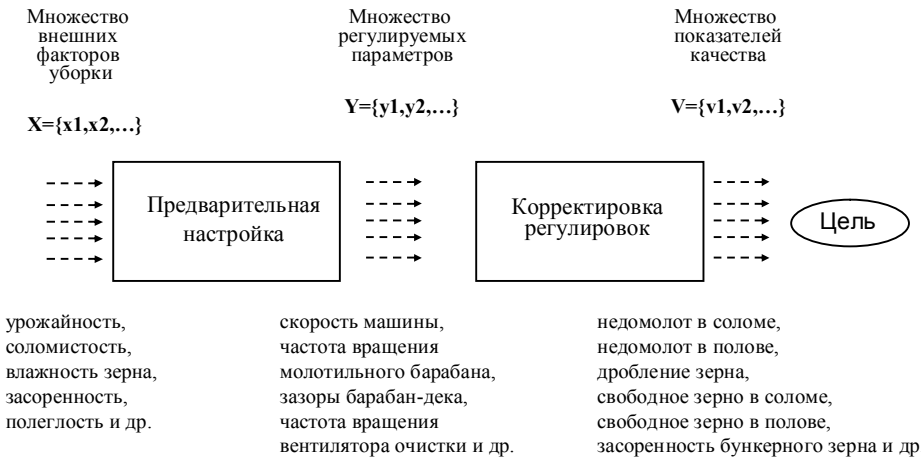


Рис.2. Информационное «поле» задач предварительной настройки и корректировки технологических регулировок зерноуборочного комбайна

Формализация знаний. Ранее нами было показано [2, 4], что задача управления технологическим процессом комбайна (технологическая настройка и корректировка технологических регулировок) есть задача приня-

тия решения в нечеткой среде (рис.3). Центральной научной проблемой при разработке информационных интеллектуальных систем является представление знаний рассматриваемых предметных областей.

Для представления знаний используется обобщенная модель предметной области в виде семантической сети [6].

$$C =< X; R_1,...,R_n; G >, \quad i = \overline{1,n} \quad ,$$

где X – множество объектов предметной области; $R_1,...R_i$ - множество типов связи между ними; G – отображение, задающее связи между объектами, входящими в X, из заданного набора типа связей.

Рис.3. Общая схема системы нечеткого управления при технологической настройке комбайна: ФП – базы данных параметров функций принадлежности

Основные этапы методики формализации нечетких экспертных знаний предметных областей представлены ниже.

1. Определение множества факторов внешней среды

$$X \in \{x_1, x_2, ..., ..., x_n\}.$$

2. Определение множества регулируемых параметров рабочих органов машины

$$Y^{РП} \in \{y_1, y_2, ..., y_k\}$$

3. Определение множества показателей качества работы

$$V \in \{v_1, v_2, ..., v_k\}$$

4. Описание лингвистических переменных (ЛП), характеризующих множество факторов внешней среды

$$\langle \beta_X; T_X; X; G; M \rangle$$

<Засоренность Хлебостоя (ЗХ), %>

5. Описание лингвистических переменных (ЛП), характеризующих множество регулируемых параметров

$$\langle \beta_Y ; T_Y ; V ; G ; M \rangle$$

<Частота Вращения Молотильного Барабана (ЧВМБ), мин$^{-1}$ >

6. Описание лингвистических переменных (ЛП), характеризующих множество показателей качества

$$\langle \beta_V ; T_V ; V ; G ; M \rangle$$

<Дробление зерна (ДЗ), % >

7. Назначение термов ЛП для факторов внешней среды, определение базового множества [2].

В общем случае базовое терм-множество рассматриваемых ЛП имеет вид

$$T_i = \{T_1^i,\ T_2^i,\ \ldots\ T_m^i\},\ (\ i \in K = \{1, 2, \ldots, l\}).$$

Здесь $\langle T_i, X; \widetilde{C}_i \rangle$ – нечеткая переменная, соответствующая терму $T_i \in T$; $\widetilde{C}_i = \{\langle \mu_{C_i}(x) / x \rangle\} \quad (x \in X)$; C_i – носитель нечеткого множества $\widetilde{C}_i$; $\mu_{C_i}(x)$ – функция принадлежности.

Базовое терм-множество образуется на основе экспертных суждений, например:

$T=\{a_i\},\ i = \overline{1, m}$ {Очень малая; Малая, Средняя, Высокая}, [0 – 50],

$$ЗХ = \{ОМЗХ,\ МЗХ,\ СЗХ,\ ВЗХ,\ \%\}.$$

8. Назначение термов ЛП для регулируемых параметров, определение базового множества, например:

$T=\{a_i\},\ i = \overline{1, m}$ {Пониженная, Номинальная, Повышенная}, [580 – 780],

$$ЧВМБ = \{ПонЧВМБ,\ НомЧВМБ,\ ПовЧВМБ,\ мин^{-1}\}.$$

9. Назначение термов ЛП для показателей качества, определение базового множества, например:

$T=\{a_i\},\ i = \overline{1, m}$ {Пониженная, Номинальная, Повышенная}, [0 – 10],

$$ДЗ = \{НДЗ,\ СрДЗ,\ ВДЗ,\ \%\}.$$

10. Проверка требований к функциям принадлежности [3]. Выбор эталона (степень уверенности эксперта в принадлежности типичного представителя соответствующему понятию равна единице).

Терм-множества рассматриваемых ЛП переменных должны удовлетворять условиям:

$$\mu_{C_1}(x') = 1, \quad \mu_{C_m}(x'') = 1; \tag{1}$$

$$(\forall T_i \in T \setminus \{T_m\})(0 < \sup_{x \in X} \mu_{C_i \cap C_{i+1}}(x) < 1); \tag{2}$$

$$(\forall T_i \in T)(\exists x \in X)(\mu_{C_i}(x) = 1); \tag{3}$$

$$(\forall \beta)(\exists x' \in R_1)(\exists x'' \in R_1)((\forall x \in X)(x' < x < x'')). \tag{4}$$

Интерпретация выражений (1) – (4) заключается в следующем.

Условие (1) подчеркивает, что функции принадлежности крайних термов ЛП не могут иметь колоколообразную форму, что обусловлено расположением этих термов в упорядоченном множестве Т.

Условие (2) оговаривает недопустимость в базовом множестве Т термов, представленных на рис.4. Случай недопустимой близости функций принадлежности (см. рис.4,а) характеризует естественную разграниченность понятий, аппроксимируемых термами (по сути понятия не различимы – тогда нет необходимости их вводить и рассматривать). Во втором случае (см. рис.4,б) имеется центральный участок области определения термов, которому не соответствует какое-либо понятие.

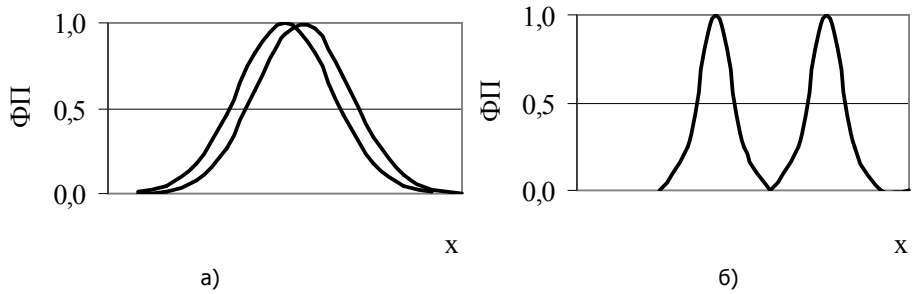


Рис.4. Варианты некорректного определения границ термов ЛП

Условие (3) указывает на то, что каждое понятие имеет хотя бы один типичный объект, обозначаемый этим понятием. Поэтому недопустимо совмещение на одном отрезке шкалы функций принадлежности с различной высотой $d = \max_{x \in X} \mu(x)$. Предполагается использование нормальных нечетких множеств с высотой $d = 1$.

Условие (4) оговаривает ограниченность области определения X конечным множеством точек. Данное условие, например, для регулируемых параметров рабочих органов, является естественным, так как эти ограничения обусловлены конструкцией машины.

Один из возможных подходов при построении функции принадлежности термов ЛП связан с использованием (L-R) представления нечеткой переменной [5]. Рассмотрим толерантные и унимодальные (L-R)- числа с функциями принадлежности

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left(\dfrac{a_1 - x}{a_L}\right), 0 \le \dfrac{a_1 - x}{a_L} \le 1, a_L > 0 \\ R\left(\dfrac{x - a_2}{a_R}\right), 0 \le \dfrac{x - a_2}{a_R} \le 1, a_R > 0 \\ 1, \dfrac{a_1 - x}{a_L} < 0 \cap \dfrac{x - a_2}{a_R} < 0 \\ 0, \dfrac{a_1 - x}{a_L} > 1 \cup \dfrac{x - a_2}{a_R} > 1 \end{cases},$$

и следующими условиями на функции L и R:

1) $L(0) = R(0) = 1,\ L(1) = R(1) = 0;$

2) $L(x)$ и $R(x)$ – монотонно убывающие функции на множестве [0,1].

$\widetilde{A}$ символически записывается в виде

$$\widetilde{A} \equiv (a_1, a_2, a_L, a_R) \quad \text{или} \quad \mu_{\widetilde{A}}(x) \equiv (a_1, a_2, a_L, a_R),$$

где a_1, a_2, a_L, a_R - параметры толерантного (L-R)-числа $\widetilde{A}$; отрезок $[a_1, a_2]$ - интервал толерантности, а a_L и a_R - соответственно левый и правый коэффициенты нечеткости.

Функция $L\left(\frac{a_1 - x}{a_L}\right)$ есть левая граница функции принадлежности толерантного (L-R)-числа, а функция $R\left(\frac{x - a_2}{a_R}\right)$ есть правая граница функции принадлежности толерантного (L-R)-числа.

При $a_L = 0$ предполагается, что $L\left(\frac{a_1 - x}{a_L}\right) = 0$, при $a_R = 0$ предполагается, что $R\left(\frac{x - a_2}{a_R}\right) = 0$.

Унимодальное (L-R)-число $\widetilde{A}$ имеет функцию принадлежности толерантного (L-R)-числа при условии $a_1 = a_2$. Символически унимодальное (L-R)-число $\widetilde{A}$ записывается в виде $\widetilde{A} \equiv (a_1, a_L, a_R)$.

11. Выбор метода построения функций принадлежности.

11.1. Метод экспертных оценок. Определение базового терм-множества, количества экспертов.

11.2. Метод деления ФП пополам. Обоснование кратности разбиения интервала.

11.3. Метод типовых функций. Определение границ толерантности. Проверка признака унимодальности функции принадлежности. Функции принадлежности термов ЛП аппроксимируются типовыми функциями вида:

для центральных термов

$$\mu_1(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad x \le a \\ \dfrac{x - a}{c - a}, & \text{если} \quad a < x \le c \\ \dfrac{b - x}{b - c}, & \text{если} \quad c < x < b \\ 0, & \text{если} \quad x \ge b \end{cases};$$

$$\mu_3(x,a,b,c,d)=\begin{cases}0, & \text{если} \quad x\le a\\ \dfrac{x-a}{c-a}, & \text{если} \quad a<x<c\\ 1, & \text{если} \quad c\le x\le d\\ \dfrac{b-x}{b-d}, & \text{если} \quad d<x<b\\ 0, & \text{если} \quad x\ge b\end{cases};$$

для крайнего правого терма

$$\mu_1(x,a,b)=\begin{cases}0, & \text{если} \quad x\le a\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & \text{если} \quad a<x<b\\ 1, & \text{если} \quad x\ge b\end{cases};$$

для крайнего левого терма

$$\mu\ (x,a,b)=\begin{cases}1, & \text{если} \quad x\le a\\ \dfrac{b-x}{b-a}, & \text{если} \quad a<x<b\\ 0, & \text{если} \quad x\ge b\end{cases}.$$

12. Определение степени нечеткости полных ортогональных семантических пространств [5].

Определение количественной оценки нечеткости информации, поступающей от экспертов.

Линейный индекс нечеткости определяется равенством:

$$d(A)=2\rho(A,\underline{A}),$$

где $\rho(A,\underline{A})=\int_0^1(\mu_A(x)-\mu_{\underline{A}}(x))dx$, $\underline{A}$ – нечеткое множество, у которого $\mu_{\underline{A}}(x)=\begin{cases}0\\1\end{cases}$ в зависимости от $\mu_A(x)$: $\mu_{\underline{A}}(x)=\begin{cases}0, & если \quad \mu_A(x)\le 0{,}5\\ 1, & если \quad \mu_A(x)>0{,}5\end{cases}$.

Показатель различия между моделями экспертного оценивания признака, представленными i-м и j-м экспертами, выражается как линейное расстояние (Хемминга) между нечеткими множествами с функциями принадлежности $\mu_{il}(x)$ и $\mu_{jl}(x)$:

$$d(\mu_{il},\mu_{jl})=\int_0^1\left|\mu_{il}(x)-\mu_{jl}(x)\right|dx.$$

Определение на основе показателей нечеткости и согласованности экспертных оценок оптимального числа термов лингвистических переменных.

13. Построение нечетких множеств термов лингвистических переменных для факторов внешней среды $\mathrm{A}=\{<\mu_{\mathrm{A}}(u),u>\}$.

14. Построение нечетких множеств термов лингвистических переменных для параметров технического состояния машины.

15. Построение нечетких множеств термов лингвистических переменных для показателей качества работы машины.

16. Реализация и анализ полученного решения.

17. Этап фаззификации [3] - лингвистическое описание признаков технического состояния и факторов внешней среды в виде семантических пространств.

Выводы. Результатом использования методики моделирования нечетких экспертных знаний является лингвистическое описание предметной области, которое включает 6 факторов внешней среды, 23 регулируемых параметров молотилки комбайна и 10 внешних признаков нарушения технологического процесса.

Для 36 лингвистических переменных определены вид и параметры функций принадлежности, базовые терм-множества. На основе формализации отношений рассматриваемых признаков создана база знаний экспертной системы для технологической регулировки комбайна, содержащая 13560 продукционных правил.

Экспертная оценка методики формализации нечетких знаний и разработанной на ее основе базы знаний показала результативность и эффективность технологической настройки в полевых условиях по сравнению с традиционным методом.

Практической реализаций является создание программных средств для автоматизированного решения задачи, которые зарегистрированы в Роспатенте (№ 2005612734, № 2005620290, № 2006610834). Использование экспертной системы при проведении технологической регулировки позволяет уменьшить затрачиваемое время в 2 – 5 раз по сравнению с традиционными методами и, как следствие, повысить на 7 - 10% сменную производительность комбайна.

Библиографический список

1. *Борисова Л.В.* Некоторые аспекты структуризации знаний предметной области "Техническое обслуживание комбайнов" / Л.В. Борисова, В.П.Димитров, В.И. Сазанович // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Сер. Математическое моделирование и компьютерные технологии. Спец. вып. - 2003.- С.59-64.

2. *Борисова Л.В.* Формализация нечеткой исходной информации при анализе технологического процесса уборочных машин / Л.В. Борисова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17: сб. тр. XVII Междунар. науч. конф.: В 10 т. Т.5 / под общ. ред. В.С. Балакирева.- Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004.- С. 64-67.

3. *Борисова Л.В.* Методика моделирования предметной области «технологическая настройка» в нечеткой постановке: докл. РАСХН / Л.В. Борисова. - 2005. - №6. - С.62-65.

4. *Борисова Л.В.* Особенности формализации знаний при логико-лингвистическом описании сложных технических систем. / Л.В.Борисова, В.П. Димитров. - Ростов н/Д: РГАСХМ, 2006. - 234 с.

5. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений/ А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 394 с.

6. Прикладные нечеткие системы /К. Асаи, Д. Ватада, С. Сугэно; пер с япон. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

Материал поступил в редакцию 8.05.08.

V.P. DIMITROV, L.V. BORISOVA

ABOUT FORMALIZATION OF COMBINE'S TECHNOLOGICAL ADJUSTMENT'S PROBLEM

The axiomatic description of a considered problem is made. Stages of formalization of indistinct expert knowledge are considered.

ДИМИТРОВ Валерий Петрович (р.1953), доктор технических наук (2002), профессор. Окончил РИСХМ (1975).
Сфера научных интересов: системы информационного обеспечения жизненного цикла продукции, экспертные системы, техническое обслуживание машин.
Имеет 300 научных публикаций, в том числе 25 учебных пособий и монографий.

БОРИСОВА Людмила Викторовна, доктор технических наук (2008), профессор. Окончила РГАСХМ (1991).
Сфера научных интересов: статистика, системы информационного обеспечения жизненного цикла продукции, менеджмент качества.
Имеет 165 научных публикаций, в том числе 10 учебных пособий и монографий.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.822.5:621.891

Ю.В.РЯДЧЕНКО, Г.В.РЯДЧЕНКО

РАСЧЁТ НАТЯГОВ ПРИ СБОРКЕ ЗАМКНУТЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Приведены результаты теоретического расчёта основных элементов замкнутого технологического пакета для нанесения композиционных покрытий.
Ключевые слова: *антифрикционные композиционные покрытия, технология нанесения, расчёт замкнутого пакета.*

Введение. Антифрикционные самосмазывающиеся композиты на основе фторопластовых волокон "полифен" используются в целом ряде тяжелонагруженных трибосистем. Они представляют собой ткань трикотаж или войлок из полимерных нитей и матричного связующего. Одним из способов технологии нанесения подобных покрытий на подшипник является их наклейка полимерным связующим. При этом давление, необходимое для отверждения связующего, создаётся в результате упругих деформаций металлической подшипниковой втулки. В этом случае раскроенный препрег (неотверждённая заготовка покрытия) фиксируется на внутренней поверхности втулки, а внутрь запрессовывается оправка, покрытая антиадгезивом. Этот комплекс - втулка, препрег, оправка называется замкнутым технологическим пакетом (рис. 1).

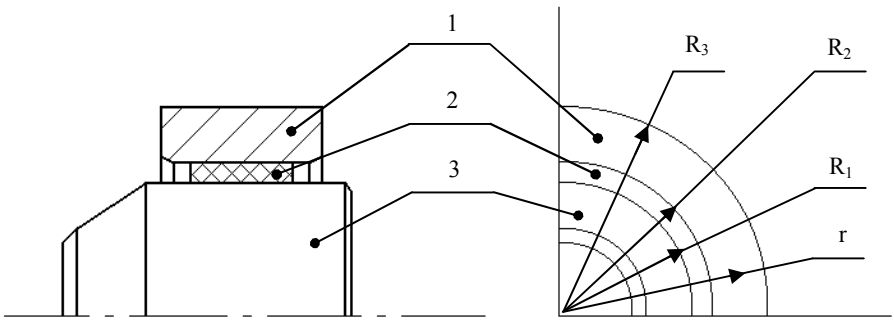


Рис. 1. Замкнутый технологический пакет: 1– втулка; 2 – препрег; 3 – оправка

Для отверждения матричного материала композита давление создаётся упругими силами, возникающими в металлической втулке после запрессовки в неё оправки. Под действием этого давления в препреге композита развивается деформация ползучести, что приводит к уменьшению толщины препрега и величины фактического натяга. Поэтому давление, создаваемое путём запрессовки оправки в пакет, должно несколько превышать требуемое для отверждения связующего.

Компоновка замкнутого технологического пакета требует знания двух параметров: диаметра отверстия в подшипниковой втулке под покрытие и величины натяга при запрессовке оправки, обеспечивающего требуемое давление отверждения связующего. Необходимые для расчёта значения окружного и радиального модулей композита покрытия определены заранее.

Постановка задачи. Для получения аналитических выражений, определяющих параметры технологического пакета, необходимо рассмотреть напряжённо-деформированное состояние набора коаксиальных цилиндров из материалов разной физической природы: металлических изотропных и ортотропных полимерных композитов.

Критерием применимости рассматриваемого технологического пакета (см. рис.1) является отсутствие пластических деформаций на наружной поверхности подшипниковой втулки при условии равенства радиальных контактных напряжений σ_{rr} величине давления отверждения матричного связующего $P_{отв}$:

$$-\sigma_{rr(r=R_2)} = P_{отв.} \qquad (1)$$

Выход пластических деформаций на наружную поверхность подшипниковой втулки потребует её дополнительной механической обработки, что нецелесообразно.

Особенность композиционной структуры покрытий, включающих на рабочей поверхности фторопластовые нити "полифен", не имеющие адгезии к связующему, и наличие пор приводят к характерному нелинейному виду начального участка зависимости $\sigma-\varepsilon$ с низким радиальным модулем (участок ОВ на рис.2). Эта кривая линеаризуется введением "естественного" состояния (точка А), при котором полагаем $\sigma_{rr} = 0$, а дальнейшее нагружение аппроксимируем лучом АС. Подобное допущение позволяет использовать геометрические соотношения и определяющие уравнения линейного вида.

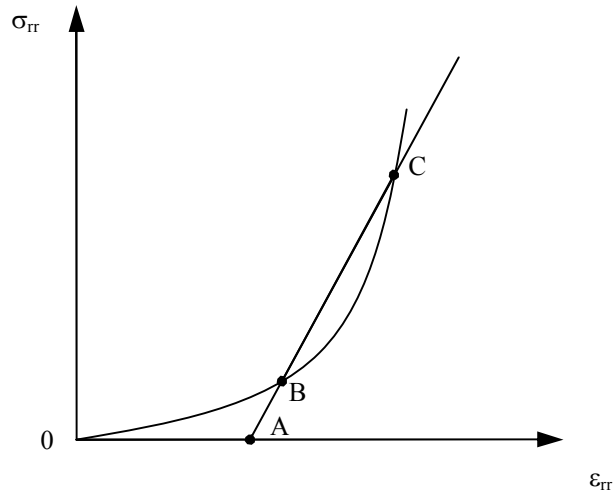


Рис.2. Диаграмма радиального деформирования препрега

Кроме того, считаем, что по сравнению с радиальными σ_{rr} и окружными $\sigma_{\varphi\varphi}$ напряжениями осевые σ_{zz} и касательные $\sigma_{r\varphi}$, $\sigma_{\varphi z}$, σ_{rz} пренебрежи-

мо малы. Это приводит к отсутствию в расчётах сдвиговых деформаций. Таким образом имеем плоское напряжённое состояние.

Решение поставленной задачи и применение результатов. В качестве исходных при решении поставленной задачи приняты следующие зависимости:

определяющие уравнения упругого цилиндрически ортотропного тела [1] для препрега:

$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E_r}\sigma_{rr} - \frac{\nu_{\varphi r}}{E_\varphi}\sigma_{\varphi\varphi};\\
\varepsilon_{\varphi\varphi} &= -\frac{\nu_{r\varphi}}{E_r}\sigma_{rr} + \frac{1}{E_\varphi}\sigma_{\varphi\varphi};\\
\varepsilon_{zz} &= -\frac{\nu_{rz}}{E_r}\sigma_{rr} - \frac{\nu_{\varphi z}}{E_\varphi}\sigma_{\varphi\varphi};
\end{aligned}\right\} ; \qquad (2)$$

определяющие уравнения упругого изотропного тела для материала оправки:

$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E}\left(\sigma_{rr} - \nu\cdot\sigma_{\varphi\varphi}\right);\\
\varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{E}\left(-\nu\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}\right);\\
\varepsilon_{zz} &= -\frac{\nu}{E}\left(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}\right).
\end{aligned}\right\} ; \qquad (3)$$

уравнения деформационной теории пластичности [2] при нагружении подшипниковой втулки;

$$\Theta = 3k\left(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}\right)$$

$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3}\Theta &= \psi\left(\frac{2}{3}\sigma_{rr} - \frac{1}{3}\sigma_{\varphi\varphi}\right);\\
\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3}\Theta &= \psi\left(-\frac{1}{3}\sigma_{rr} + \frac{2}{3}\sigma_{\varphi\varphi}\right);\\
\varepsilon_{zz} - \frac{1}{3}\Theta &= \psi\left(-\frac{1}{3}\sigma_{rr} - \frac{1}{3}\sigma_{\varphi\varphi}\right);
\end{aligned}\right\} ; \qquad (4)$$

уравнение равновесия:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr}r + \sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi}; \qquad (5)$$

линейные геометрические соотношения:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{dU_r}{dr}; \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{U_r}{r}. \qquad (6)$$

В выражениях (2)-(6) обозначено: σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ – радиальные и окружные компоненты тензора напряжений; ε_{rr}, $\varepsilon_{\varphi\varphi}$, ε_{zz} – радиальная, окружная и осевая компоненты тензора деформаций; U_r – радиальное перемещение; E_r и E_φ – радиальные и окружные модули Юнга препрега; E – модуль Юнга материала оправки; ν – коэффициент Пуассона материала оправки; $\nu_{r\varphi}$, ν_{rz}, $\nu_{\varphi z}$ – коэффициенты Пуассона препрега (первый индекс – направление растяжения, второй – поперечной деформации); ψ – коэффициент пропорциональности между девиаторами тензоров напряжений и деформаций; k – объёмная сжимаемость материала втулки; $\Theta = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}$ – объёмная деформация.

На границах раздела элементов технологического пакета справедливы условия:

$$U_{r(r=R_1+0)} - U_{r(r=R_1-0)} = i; \quad U_{r(r=R_2+0)} = U_{r(r=R_2-0)}; \qquad (7)$$

$$\sigma_{rr(r=R_1+0)} = \sigma_{rr(r=R_1-0)}; \quad \sigma_{rr(r=R_2+0)} = \sigma_{rr(r=R_2-0)},$$

где i – радиальный натяг.

На наружной поверхности подшипниковой втулки имеем условие свободной границы

$$\sigma_{rr(r=R_3)} = 0. \qquad (8)$$

Для определения искомых параметров вначале необходимо проинтегрировать уравнения (4) и (5) для каждого из элементов пакета:

в оправке – с определяющими уравнениями (3); в препреге – с (2); во втулке – с (4).

Интегрирование приводит к следующим выражениям:

для оправки ($r<R_1$)

$$\sigma_{rr} = S; \; U_r = \frac{1-\nu}{E} Sr; \qquad (9)$$

для препрега ($R_1<r<R_2$)

$$\sigma_{rr} = Pr^{\lambda_1} + Qr^{\lambda_2}; \qquad (10)$$

$$U_r = -\frac{1}{E_\varphi}\left(\beta + \nu_{21}\right) Pr^{-\beta} + \frac{1}{E_\varphi}\left(\beta - \nu_{\varphi r}\right) Qr^{\beta};$$

где S, P, Q – постоянные интегрирования;

$$\beta = \sqrt{\frac{E_\varphi}{E_r}}; \qquad \lambda_1 = -1-\beta; \qquad \lambda_2 = -1+\beta.$$

Для подшипниковой втулки в плоском напряжённом состоянии проинтегрируем уравнения деформационной теории пластичности, используя подход [3], но реализованный аналогично случаю плоской деформации.

В качестве независимой переменной используем величину

$$\eta = \sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{rr} = 2\left|\tau_{max}\right|,$$

где τ_{max} – наибольшие по всем площадкам касательные напряжения.

В результате имеем:

$$\sigma_{rr} = \left[\frac{3}{2} z(\eta;\eta_2) + (2\eta_2 - p) \frac{dz}{d\eta}\bigg|_{\eta=\eta_2} \right] \cdot \frac{dz}{d\eta} - 2\eta; \qquad (11)$$

$$U_r = r\left[k(2\sigma_{rr} + \eta) + \frac{1}{3}\psi(\eta) \cdot (\sigma_{rr} + 2\eta) \right]; \qquad (12)$$

где

$$z(\eta;\eta_2) = \int_{\eta_2}^{\eta} \left[k + \frac{2}{3}\psi(\mu) \right]^{\frac{1}{4}} d\mu; \qquad (13)$$

μ - переменная интегрирования, обозначающая текущее значение аргумента функции $\psi(\eta)$; $\eta_2=\eta(r=R_2+0)$; $p=-\sigma_{rr}(r=R_2+0)$.

Зависимость $\eta(r)$ определяется в виде обратной функции:

$$\ln\frac{r}{R_2} = -2\ln\frac{\eta}{\eta_2} + \left(\frac{P}{\eta_2} - 2\right) + \frac{\frac{3}{2}z(\eta) + A}{\eta z'(\eta)} + \int_{\eta_2}^{\eta} \frac{\frac{3}{2}z(\xi) + A}{\xi^2 z'(\xi)} d\xi, \qquad (14)$$

где ξ - текущее значение аргумента η функции $z(\eta,\eta_2)$ в равенстве (13);

$$A = (2\eta_2 - p)z'(\eta_2).$$

Введём упрощающие обозначения:

$$q = \nu_{\varphi r} + \frac{E_\varphi}{E}(1-\nu); \qquad d = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^\beta - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^\beta;$$

$$D = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^\beta + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^\beta; \quad K=\beta D+qd; \qquad M = \frac{2\beta}{K};$$

$$N = \frac{\frac{1}{E_r}(\nu_{r\varphi}q - 1)d - \beta D\frac{1-\nu}{E}}{K}$$

Удовлетворяя граничным условиям (7), получим три уравнения:

$$M\frac{i}{R_2} + Np = k(\eta_2 - 2p) + \frac{1}{3}\psi(\eta_2)\cdot(2\eta_2 - 2p); \qquad (15)$$

$$\frac{3}{2}z(\eta_3) + (2\eta_2 - p)z'(\eta_2) - 2\eta_3 z'(\eta_3) = 0; \qquad (16)$$

$$\frac{p}{\eta_2}-2\ln\frac{\eta_3}{\eta_2}+\int_{\eta_2}^{\eta_3}\frac{\frac{3}{2}z(\xi)+(2\eta_2-p)z'(\eta_2)}{\xi^2 z'(\xi)}d\xi=\ln\frac{R_3}{R_2};\qquad(17)$$

$$\eta_3=\eta(r=R_3+0).$$

Приняв $p=\sigma_{отв}$, в уравнениях (15) – (17) будем иметь три неизвестных: i – натяг и удвоенные максимальные касательные напряжения на внутренней η_2 и наружной η_3 поверхности подшипниковой втулки. Величина η_3 позволяет судить о выходе области пластической деформации на наружную поверхность втулки, т.е. о применимости рассматриваемого технологического пакета.

Конкретизация полученных уравнений требует определения функции $\psi(\eta)$ по результатам экспериментальных исследований.

Сдвиговую деформацию описываем условием изотропного упрочнения в форме Сен-Венана [2]:

$$\gamma=\Gamma(2\tau),\qquad(18)$$

где τ - наибольшие по всем площадкам касательные напряжения; γ - наибольшие сдвиговые деформации.

Для определения функции $\Gamma(2\tau)$ и $\psi(\eta)$ используем данные экспериментов на одноосное растяжение образцов из материала подшипниковой втулки за пределом упругости на этапе активного нагружения:

$$\varepsilon_{zz}=F(\sigma_{zz}).\qquad(19)$$

Из пропорциональности компонент девиаторов напряжений и деформаций имеем:

$$\varepsilon_{zz}-k\sigma_{zz}=\frac{2}{3}\psi(\sigma_{zz}).\qquad(20)$$

С учётом равенства $2\tau=\sigma_{zz}$ и (19) получим:

$$\Gamma(\sigma_{zz})=\frac{3}{2}\left[F(\sigma_{zz})-k\cdot\sigma_{zz}\right]$$

и

$$\psi(\sigma_{zz})=\frac{3}{2}\left[\frac{F(\sigma_{zz})}{\sigma_{zz}}-k\right],\qquad(21)$$

откуда секущая податливость материала втулки при одноосном растяжении (см. выражение (13)) будет:

$$\Pi(\sigma_{zz})=\frac{F(\sigma_{zz})}{\sigma_{zz}}=k+\frac{3}{2}\psi(\sigma_{zz}).\qquad(22)$$

Из равенства (22) функция $\psi(\eta)$ может быть выражена через функцию $\Pi(\eta)$, связывающую одноосное напряжение и одноосную деформацию при любой монотонной зависимости ε_{zz} (σ_{zz}), полученной экспериментально. При этом объёмная сжимаемость k полагается соответствующей упругому состоянию материала и определяется по известным формулам теории упругости.

Принимаем степенной закон нелинейного нагружения в виде:

$$\sigma_{zz} = m\varepsilon_{zz}^{n}, \quad n<1. \tag{23}$$

В этом случае система уравнений (15) – (17) конкретизируется и решается в следующей последовательности.

1. Находим решение уравнения

$$1 - n - \frac{(3n+1)^2}{2} \ln\frac{R_3}{R_2} - (1-n)\varsigma = 4n \cdot \ln\varsigma \tag{24}$$

относительно безразмерной переменной

$$\varsigma = 1 - \frac{3n+1}{2} \cdot \frac{P}{\eta_2}. \tag{25}$$

2. Определяем относительный натяг $i_{\circ} = \dfrac{i}{R_2}$ из уравнения (15), приняв $p=\sigma_{отв}$ и найдя η_2 из (25).

3. Применимость рассматриваемого технологического пакета оценивается по соотношению

$$\eta_3 = \eta_2 \varsigma^{\frac{4n}{3n+1}} \le \sigma_s, \tag{26}$$

где - σ_s – напряжение текучести.

Полученные выражения позволили рассчитать величины относительных натягов в зависимости от толщины подшипниковой втулки из стали 45 и определить зону допустимых натягов (рис. 3).

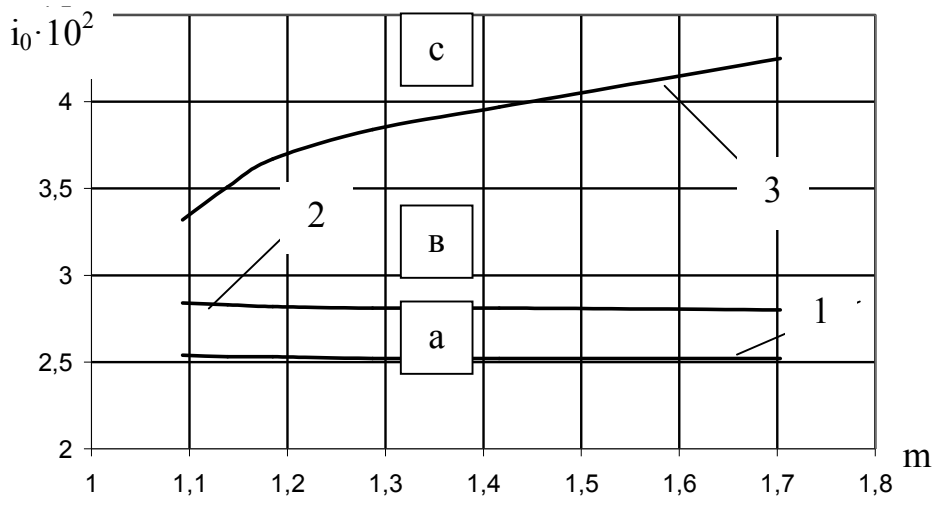


Рис. 3. Влияние относительной толщины подшипниковой втулки на величину относительного натяга технологического пакета: для упругопластического состояния втулки 1 – $\sigma_{отв}$= 5 МПа, 2 – $\sigma_{отв}$= 10 МПа; 3 – для полностью пластического состояния втулки

На рис. 3 выделены: рекомендуемая зона натягов *а*, допустимая зона *в* и зона, требующая наличия обоймы, увеличивающей жёсткость пакета, *с*. Расчёт выполнен для препрега толщиной 0,75 мм и давления отверждения матричного связующего 5…10 МПа.

Кроме того, в соответствии с результатами расчётов на втулку ∅20×∅30×20 было нанесено антифрикционное покрытие, которое удовлетворительно прошло стендовые испытания (V=0,2 м·с$^{-1}$; σ=30 МПа).

Выводы. Для случая плоского напряжённого состояния решена задача о нанесении антифрикционного полимерного композита на внутреннюю поверхность металлической подшипниковой втулки.

Прикладным результатом работы является методика расчёта натягов при сборке технологических пакетов, обеспечивающая качественное нанесение антифрикционного композитного покрытия на рабочую поверхность подшипниковой втулки.

Библиографический список

1. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. / С.Г.Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

2. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

3. *Ильюшин А.А.* Упругопластические деформации полых цилиндров. / А.А.Ильюшин, П.М.Огибалов. – М.: МГУ, 1960. – 227 с.

Материал поступил в редакцию 17.03.08.

J.V.RYADCHENKO, G.V.RYADCHENKO

CALCULATION OF MODES OF COATING OF COMPOSITE COVERINGS ON BEARINGS OF SLIDING

In work results of theoretical calculation of basic elements of the closed technological package for coating composite coverings are brought.

РЯДЧЕНКО Юлия Викторовна, младший научный сотрудник НПГП "Синтез" ДГТУ, кандидат технических наук (2007). Окончила Новочеркасский политехнический институт им. Серго Орджоникидзе (1987) по специальности "Химическая технология стекла и ситаллов".
Автор 5 научных работ в области трения композиционных материалов.

РЯДЧЕНКО Гавриил Викторович (р. 1976), старший преподаватель кафедры "Технология технического регулирования" ДГТУ, кандидат технических наук (2003), окончил Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) (1998) по специальности "Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов".
Автор 15 научных работ в области трения и изнашивания металлополимерных систем.

УДК 621.822.5

В.А.МОРДВИНКИН

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ УПОРНОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА (УГСП) С УЧЁТОМ ВРАЩЕНИЯ

В представленной работе на основе уравнения Рейнольдса методом конечных элементов решена задача о распределении давления в смазочной плёнке УГСП . Исследовано влияние вращения на распределение давления и на несущую способность подшипника. Проведены сравнения основных параметров УГСП с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.
Ключевые слова: *газовая смазка, подшипник*

Введение. Создание новых конструкций высокопроизводительных машин порождает повышенные требования к узлам трения. В ряде случаев появилась необходимость в узлах трения, способных обеспечить работу машины в широком диапазоне скоростей, высокую точность перемещения, эксплуатацию в экстремальных условиях (высокие и низкие температуры, радиация, агрессивные среды). Решить данную проблему позволило применение узлов трения, смазываемых газом (газовых опор).

В работах, посвящённых расчёту основных характеристик газостатических подшипников, влиянием вращения подвижного элемента на распределение давления в газовом слое подшипника, как правило, пренебрегают, что справедливо при небольших относительных скоростях смазываемых поверхностей. При угловых скоростях вращения 100 тыс об/мин. и более пренебрежение влиянием вращения приводит к существенным погрешностям в расчёте основных характеристик подшипников [1].

В данной работе на основе гидродинамической модели, учитывающей дискретный характер наддува, предложены методы расчета основных характеристик однорядного упорного газостатического подшипника с учётом вращения подвижного элемента (рис.1).

Постановка задачи. Течение газа в зазоре изотермическое. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что разогрев газового слоя при вращении ротора незначительный и не превышает нескольких десятков градусов. Вязкость газа не зависит от давления. Подобное допущение справедливо для газовых опор в связи с относительно небольшим избыточным давлением, возникающим в зазоре подшипника.

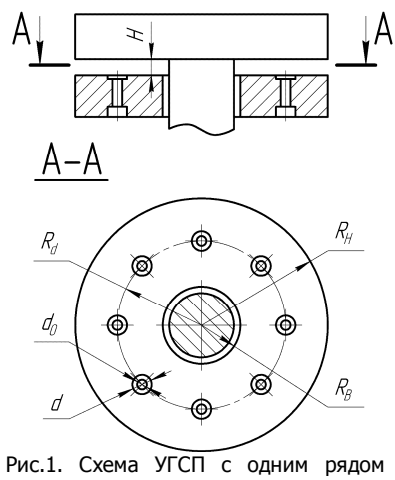


Рис.1. Схема УГСП с одним рядом дискретных питателей: R_H - радиус наружной кромки подшипника; R_B - радиус внутренней кромки подшипника; R_d - радиус линии расположения питателей; d - диаметр питателя

Задача о нахождении несущей способности упорного газостатического кольцевого подшипника (УГСП) с дискретным наддувом через N питателей и с учётом вращения при установившемся

ламинарном изотермическом течении газа в зазоре сводится к решению уравнения Рейнольдса [2]

$$\frac{1}{R}\cdot\frac{\partial}{\partial R}\left[RH^3\frac{\partial P^2}{\partial R}\right]+\frac{1}{R^2}\cdot\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[H^3\frac{\partial P^2}{\partial\varphi}\right]=12\mu\omega_\alpha\frac{\partial}{\partial\varphi}(P), \qquad (1)$$

с граничными условиями:

на кромках подшипника давление равно атмосферному

$$P^{/}\Big|_{R=R_H}=P_a;\ P^{/}\Big|_{R=R_B}=P_a, \qquad (2)$$

на выходе из питателей давление p_d одинаково в виду симметричности задачи $P^{/}\Big|_{R=\Gamma_d}=P_d$.

Будем считать, что величина зазора подшипника H- постоянная. Перейдём в уравнении (1) к безразмерным переменным:

$$P^{/}=P\cdot P_S;\ P_a=P_l\cdot P_S;\ P_d^{/}=P_d\cdot P_S.;\ R=R_H\cdot r, \qquad (3)$$

где P_a - противодавление на кромках подшипника; P_S - давление наддува; P_d -давление на выходе из питателя.

Пользуясь формулами (3), приведём уравнение Рейнольдса (1) и граничные условия (2) к безразмерному виду:

$$divgrad(P^2)=\sigma\frac{\partial\sqrt{P^2}}{\partial\varphi}, \qquad (4)$$

где $\sigma=\dfrac{12\mu\omega_0R_H^2}{H^2P_S}$ - параметр сдавливания;

на кромках подшипника давление

$$P\Big|_{r_n=1}=P_1;\ P\Big|_{r_B=\frac{R_B}{R_H}}=P_1; \qquad (5)$$

на кромках питателя давление

$$P\Big|_{r-питателя.}=P_d. \qquad (6)$$

Решение уравнения (4) с граничными условиями (5) и (6) проведём численно, используя метод конечных элементов.

Уравнение баланса расходов смазки. Входящее в граничные условия давление на выходе из питателя P_d неизвестно, и для его определения необходимо дополнительное уравнение. Этим уравнением является уравнение баланса расходов смазки, втекающей через питатель в зазор подшипника и протекающей через боковую поверхность цилиндра высотой H, проведённую вблизи питателя

$$M=Q. \qquad (7)$$

Истечение через питатель рассчитывается как одномерное течение идеального газа в конфузоре с минимальным сечением A

Расход газа через питатели определяется по формуле

$$M = \alpha\left(\frac{2}{æ+1}\right)^{\frac{æ+1}{2(æ-1)}} \frac{æ P_s A}{a_s} q(P^2{}_d), \qquad (8)$$

где α =0,8–поправочный коэффициент, определяемый экспериментально; $æ$ = 1,4 (для воздуха) - показатель адиабаты газа; A – площадь минимального сечения питателя; a_s - скорость звука; $q(P)$ - газодинамическая функция.

$$q(P) = \begin{cases} 1 \quad при \quad p^2 \le \left(\frac{2}{æ+1}\right)^{\frac{2æ}{æ-1}} \\ \sqrt{\frac{2}{æ-1}}\left(\frac{2}{æ+1}\right)^{\frac{æ+1}{2(æ-1)}} \sqrt{(p^2)^{\frac{1}{æ}} - (p^2)^{\frac{æ+1}{2æ}}} \\ при \quad p^2 > \left(\frac{2}{æ+1}\right)^{\frac{2æ}{æ-1}} \end{cases} \qquad (9)$$

Расход газа через цилиндрическую поверхность вблизи питателя (рис.2) определяется формулой

$$Q = \int_0^{2\pi} \xi_n \partial\theta \int_0^H v_\xi \rho dz,$$

где $v_\xi = -\frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial P'}{\partial \xi}\Big|_{\xi=\frac{d'}{2}} z(H-z)$ - скорость вдоль оси ξ; при этом ось ξ не совпадает с осью R.

Влияние вращения на распределение скорости и давления на кромке питателей учтём, приняв, ввиду симметричности задачи по φ, их среднее значение, близким к значениям при отсутствии вращения.

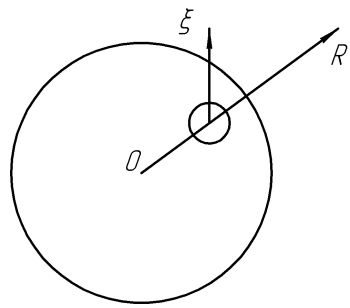


Рис. 2. Направление осей R и ξ

Так как плотность газа в зазоре

$$\rho = \frac{P' æ}{a_s^2},$$

где P' - давление газа в зазоре, a_s -скорость звука ,

то расход газа можно представить в виде

$$Q = -\int_0^{2\pi}\int_0^H \frac{P' æ}{a_s^2} \cdot \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p'}{\partial \xi}\Big|_{\xi=\frac{d}{2}+0} z(H-z)\frac{d'}{2} d\theta \cdot dz.$$

Или, производя интегрирование

$$Q = -2\pi \frac{d'}{2} \frac{æ}{a_s^2} \cdot \frac{1}{4\mu} \cdot \frac{\partial p'^2}{\partial \xi}\Big|_{\xi=\frac{d}{2}+0} \left(\frac{H^3}{2} - \frac{H^3}{3}\right) = -\frac{\pi H^3 \mathrm{d}' æ}{24\mu a_s^2} \cdot \frac{\partial p'^2}{\partial \xi}\Big|_{\xi=\frac{d}{2}}$$

и переходя к безразмерным переменным по формулам (3), устанавливаем

$$Q = -\frac{\pi H^3 \mathrm{d}æ \mathrm{P}_s^2}{24\mu a_s^2 R_H} \cdot \left.\frac{\partial P^2}{\partial \eta}\right|_{\eta=\frac{d}{2R_H}} \cdot, \qquad (10)$$

где $\xi = R_H \cdot \eta$, $\eta = \frac{\xi}{R_H} \cdot \frac{d}{2R_H}$

Подставляя значения Q из (10) и M из (8) в уравнение (7), получим уравнение баланса расхода смазки в виде

$$-\left.\frac{\partial P^2}{\partial \eta}\right|_{\eta=\frac{d}{2R_H}} = \gamma \cdot q(P_d^2), \qquad (11)$$

где $\gamma = \alpha\left(\frac{2}{æ+1}\right)^{\frac{æ+1}{2(æ-1)}} \frac{24\mu a_s A R_H}{\pi H^3 \mathrm{Pd}_s}$ - конструктивный параметр.

Совместное решение дифференциального уравнения (3) с граничными условиями (5),(6) и уравнения (11) проведено численно с использованием метода конечных элементов, что позволило определить поле давлений в зазоре подшипника и несущую способность УГСП как в безразмерном $\mathrm{C_w}$, так и в размерном W виде

$$W = P_s R_H^2 \int_0^{2\pi} \int_{r=\frac{R_B}{R_H}}^{r=1} \mathrm{Pr} \cdot dr \cdot d\varphi - \pi P_a \left(R_H^2 - R_B^2\right), \mathrm{C_w} = \frac{W}{2\pi\left(R_H^2 - R_B^2\right)\left(P_S^2 - P_a^2\right)}.$$

Анализ результатов вычислений. Предложенный метод расчета УГСП с дискретными питателями реализован в среде Flex.PDE методом конечных элементов, учитывающим реальные расположение и размеры питателей.

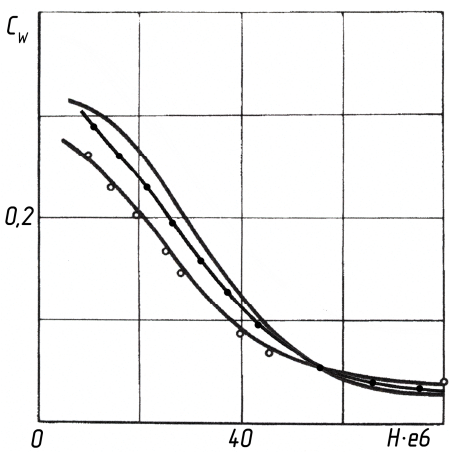


Рис. 4. Зависимость коэффициента несущей способности C_W от осевого зазора H: 1 – эксперимент; 2 – по методике работы; 3 – приближенная аналитическая теория [2]

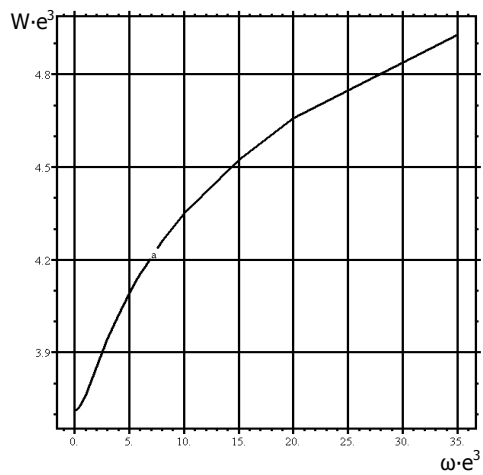


Рис. 5. Зависимость несущей способности W от угловой скорости вращения ω

На рис. 4 представлены результаты расчета зависимости коэффициента несущей способности Cw от осевого зазора H для УГСП с одним рядом питателей. R_H=0,112 м, R_B = 0,0425 м, R_d = 0,08 м, d = $0{,}8 \cdot 10^{-3}$ м, N=12, воздух, P_s = 4, 9 МН/м^2 (5 ат) P_a = 0,98 МН/м^2 (1 ат)].

Из сравнительного анализа графиков видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных с результатами, полученными в данной работе. Расхождение составляет не более 15%.

Проведены исследования поля давлений и несущей способности УГСП с учетом вращения. Из рис.5 видна слабая зависимость несущей способности УГСП от скорости вращения опоры в пределах 5-6 тысяч оборотов в минуту. При дальнейшем увеличении скорости вращения изменение давления может быть существенным и составлять до 40 % от значения несущей способности УГСП при отсутствии вращения.

Библиографический список

1. *Константинеску В.Н.* Газовая смазка. / В.Н. Константинеску. - М.: Машиностроение, 1968, - 718 с.

2. *Мордвинкин В.А.* Расчёт и проектирование упорных кольцевых газостатических подшипников турбомашин атомных энергетических установок. / В.А.Мордвинкин, В.Ф.Данильченко, А.И.Снопов. РТМ 108.129.104-78.

Материал поступил в редакцию 25.03.08.

V.A.MORDVINKIN

BEARING ABILITY PERSISTENT GASOSTATIC. THE BEARING IN VIEW OF ROTATION

In the presented work on the basis of Reynolds's equation the method of final elements solves a problem about distribution of pressure in lubricant film. Influence of rotation on distribution of pressure and on bearing ability of the bearing is investigated. Comparisons of key parameters with theoretical and experimental data of other authors are lead

МОРДВИНКИН Валерий Андреевич (р. 1946), доцент кафедры «Теоретическая механика», кандидат технических наук (1985). Окончил механико-математический факультет РГУ (1971).
Научные интересы связаны с теорией газовой смазки.
Автор более 50 научных работ.

УДК 121.822.002

В.А. КОХАНОВСКИЙ, Ю.В. СИДЕЛЬНИК-РУБАНОВА

ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

Приведены результаты исследования момента страгивания металлополимерных пар трения в условиях вращательного движения. Определены данные о влиянии термосилового нагружения на коэффициент трения.
Ключевые слова: *фторопластсодержащее композиционное покрытие, тензобалка, трибосистема, коэффициент трения покоя, регрессионные модели.*

Введение. Металлополимерные трибосистемы с фторопластсодержащими композиционными покрытиями широко применяются в авиакосмической и транспортной технике. Они представляют собой гибридный композит на основе полимерных волокон «полифен» и «аримид Т», пропитанных фенолформальдегидным связующим ГИПК-114. Подобные материалы предназначены для тяжелонагруженных и относительно низкоскоростных трибосистем [1]. Превышение пусковых моментов трения над рабочими требует определенных запасов мощности у машин и агрегатов.

Кроме того, реалогическая природа металлполимерного контакта делает пусковые характеристики подобных сопряжений зависящими от скорости вращения. Последнее обстоятельство в ряде случаев вызывает необходимость периодических контрольных прокруток сопряжений, что делает информацию о пусковых характеристиках важной и актуальной для эксплуатационной практики. Информация о пусковых характеристиках рассматриваемых материалов в настоящее время практически полностью отсутствует.

Постановка задачи. Для восполнения этого пробела и расширения области применимости рассматриваемых материалов необходимо получить данные о коэффициентах (моментах) трения покоя. В настоящее время величина этих параметров может быть определена только в результате экспериментальных исследований, которые велись на гамме трибосистем с различным сочетанием марок композит-металл для разных нагрузочно-скоростных режимов.

Методика исследования. Установка для определения пусковых параметров трибосистем разработана на базе токарно-винторезного станка. Для компенсации инерции привода в цепь от шпинделя к контртелу включена электромагнитная муфта. Нагрузочное устройство представлено на рис.1.

Внутрь (имеющей возможность самоустановиливаться по валу) устройства вставлены две обоймы 1, 5, в которых фиксированы штифтами 10 вкладыши с покрытием. Усилие нагружения создается пластинчатой пружиной 6, а отсчитывается по индикатору часового типа 7. Крутящий момент действует на тензобалку 9, усиливается и фиксируется на ленте самопишущего быстродействующего прибора Recorder indim 621.01. Чувствительность прибора 0,1 μu/см, скорость лентопротяжки 1,0 – 600 мм/мин.

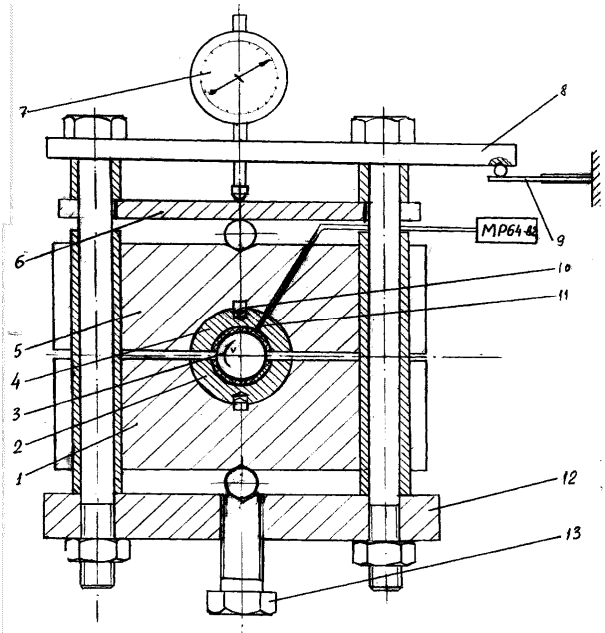


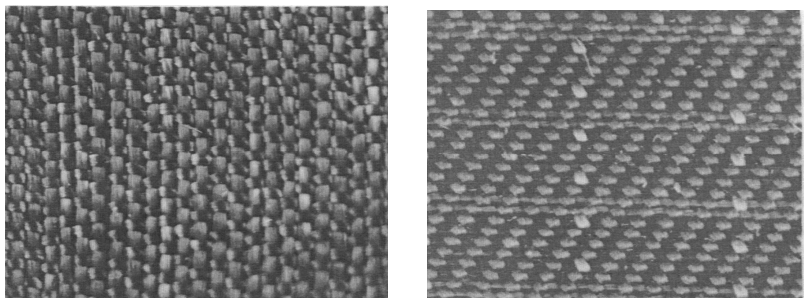
Рис.1. Нагрузочное устройство: 1 – нижняя обойма; 2 – вкладыш нижний; 3 – контртело-вал; 4 – вкладыш верхний; 5 – обойма верхняя; 6 – пружина; 7 – индикатор; 8 – рычаг; 9 – тензобалка; 10 – фиксаторы; 11 – термопара; 12 – опора; 13 – нагружающий винт

Исследовалось четыре типа композитов:

- шестиремизный неправильный полуторослойный атлас толщиной 0,23 мм и 0,53 мм;
- полуторослойная саржа 1/3, толщиной 0,45 мм;
- однослойная саржа 1/1 (полотно), толщиной 0,30 мм.

Полуторослойные ткани имели основу и верхний уток из фторопласта (рис.2).

Кроме того, у саржи ⅓ на поверхность с шагом 6 мм выведены нити аримида. Однослойная саржа $^{1}/_{1}$ выполнена из комплексных крученых нитей (две – полифен, одна – аримид).



а б

Рис. 2. Поверхность армирующих тканей: а – атлас, б – саржа ⅓

Покрытие наносилось на частичные вкладыши Ø 14х10 мм (рис.3). Контртела представляли собой валики Ø 14х20 мм из сталей марок - сталь 45, ШХ 15, нержавеющая сталь 14Х 17Н2 и титановый сплав ВТ 3-1.

Поверхность контртел доводилась до R_a 0,4-0,5 мкм. Эксперименты выполнялись в соответствии с полнофакторным двухуровневым планом 2^2. Исходные данные представлены в табл.1.

Таблица 1

Исходные данные ПФЭ 2^2

№ п/п	Факторы		Уровни факторов			Интервал варьирования	Кодовые обозначения
	Наименование	Размерность	верхний	нижний	средний		
1	Контактные напряжения	МПа	75	5	40	35	X_1
2	Скорость скольжения	м/с	0,5	0,08	0,29	0,21	X_2

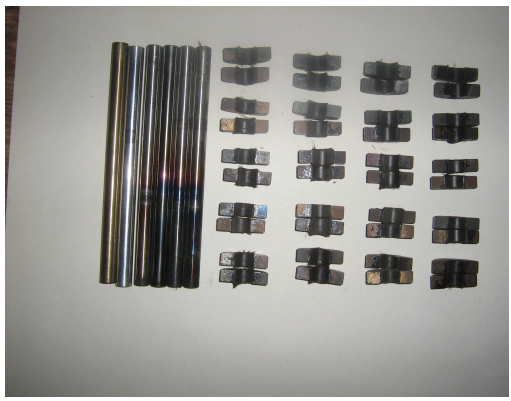


Рис. 3. Общий вид контртел и вкладышей

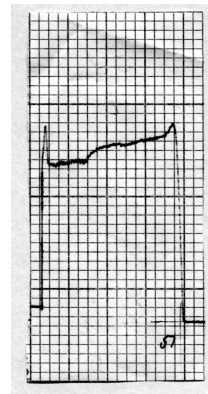


Рис. 4 Момент страгивания (σ=75 МПа, *V* = 0,08 м/с; атлас δ=0,55 мм арт. 5387/2-79 – сталь 45)

Влияние температуры на процесс страгивания устанавливалось по результатам однофакторного эксперимента. Зона трения нагревалась до температуры 150^0 С (423^0К) трубчатой печью. Термостатирование осуществлялось при помощи термопары ХК и регулирующегося милливольтметра МР 64-82. При экспериментальных исследованиях выполнялось не менее трех параллельных опытов, а результаты подвергались статистической обработке.

Обсуждение результатов. Типичные результаты изменения момента трения при страгивании и стационарном вращении приведены на рис.4.

В связи с весьма малой величиной предварительного смещения первоначальный пик момента трения на диаграмме (см. рис.4) действует практически мгновенно. При указанных режимах для неприработанной пары момент страгивания или рассчитанный по его величине коэффициент трения покоя превышает стационарные величины в среднем на 8,5%.

Первым результатом экспериментальных исследований являлись регрессионные модели зависимости коэффициента трения покоя от нагрузочно-скоростных факторов в кодовых переменных.

$$f_n = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{1,2} x_1 x_2 \,. \qquad (1)$$

Анализ структуры моделей свидетельствует о наличие коэффициентов смешанных взаимодействий. Величины коэффициентов моделей (стан-

дартные обозначения), представленных в кодовых переменных, приведены в табл.2.

Таблица 2

Параметры регрессионных моделей
(кодовые переменные)

№ п/п	Армирующий каркас композита	Толщина, мм	Коэффициенты			
			$в_0$	$в_1$	$в_2$	$в_{12}$
1	Атлас неправильный	0,55	-1,0550	0,2207	0,1895	0,0802
2	-«-	0,31	-1,0575	0,2207	0,1362	0,0446
3	Саржа ⅓	0,47	-1,0196	0,1806	0,1522	0,0703
4	Саржа $^1/_1$	0,33	-0,2308	0,2186	0,1920	0,0898

Сравнительный анализ величины коэффициентов моделей показывает минимальный вклад в результаты экспериментов смешанных взаимодействий и наибольшее влияние контактных напряжений. Последнее обстоятельство может быть объяснено относительно низкой жесткостью полимерного покрытия. Следовательно, стандартный расчет по «PV» металлополимерных трибосистем мало информативен как в стационарном, так и в пусковом режиме.

Следует отметить, что при неизменном характере влияния скоростного фактора величины выхода моделей должны возрастать при увеличении габаритов трибосопряжения. Это связано с зависимостью адгезионной составляющей силы трения от величины контактной площади и величины инерционной составляющей от страгиваемой массы.

Дальнейшая обработка результатов ПФЭ 2^2 позволила получить регрессионные модели зависимости коэффициента трения покоя от контактной нагрузки и скорости страгивания (см. табл.2). Модели в натуральных переменных имеют однотипную структуру вида:

$$f = a\sigma^b V^{c+d\lg\sigma}, \qquad (2)$$

где f – коэффициент трения; σ – средние контактные напряжения в МПа; V – скорость скольжения в м/с; a,b,c,d – параметры.

Таблица 3

Параметры регрессионных моделей
(натуральные переменные)

№ п/п	a	b	c	d
1	0,2968	-0,1528	0,0430	0,3315
2	0,3115	-0,2422	0,097	0,1904
3	0,236	-0,0972	-0,004	0,3004
4	0,2801	-0,1034	-0,0114	0,3838

Последовательность и порядковые номера композитов в табл.2 и 3 совпадают. Анализ табличных данных позволяет сделать ряд выводов.

1. Процесс страгивания и, по-видимому, величина предварительного смещения для всех исследованных композиционных покрытий подчиняются близким закономерностям и имеет один порядок.

2. Покрытия с армирующим каркасом на основе тканей атласного плетения более чувствительны к нагрузкам, что очевидно связано со

100%-ным содержанием фторопластовых нитей на поверхности покрытия. Ткани саржевого плетения в среднем на 49,2% менее чувствительны к нагрузкам из-за наличия на рабочей поверхности более жестких нитей из аримида.

3. В сравнении с коэффициентом трения при стационарных режимах [3] коэффициенты трения покоя выше на 6-9%.

Значительное влияние на фрикционные свойства полимеров оказывает температура [1, 2]. Обработка методом наименьших квадратов результатов однофакторного эксперимента позволила получить для атласа толщиной 0,55мм температурную зависимость вида:

$$f = 0{,}7415T^{-2{,}493}, \tag{3}$$

где T – температура зоны трения 10^{-2}К.

Переводя выражение (3) в безразмерные величины и используя результаты нагрузочноскоростных исследований, получим обобщенную модель вида:

$$f = 4{,}3\sigma^{-0{,}15}T^{-2{,}49}V^{0{,}043+0{,}33\lg\sigma}. \tag{4}$$

Графическая интерпретация модели (4) выполнена методом двумерных сечений (рис.5).

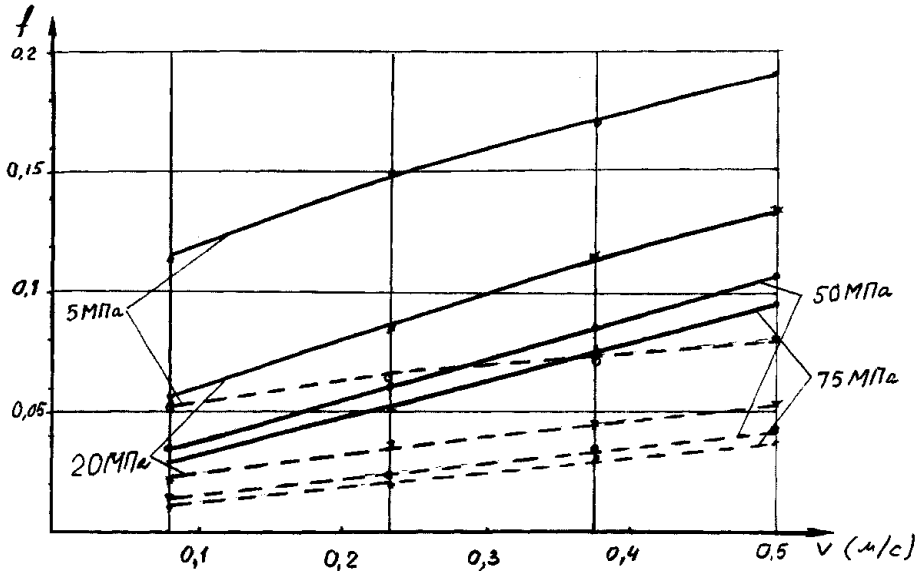


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от термосилового нагружения:
— Т =293^0 К; --- Т = 423^0 К

Антифрикционность фторопласта определяется относительной слабостью межплоскостных связей и его адгезионным переносом на контртело. В связи с адгезионной способностью поверхности природа и даже марка материала контртела, контактирующего с покрытием, влияют на условия страгивания. Результаты сравнительных экспериментальных исследований трибосопряжений с контртелами из различных материалов сведены в табл.4, номера соответствуют покрытиям из табл.1.

Таблица 4

Коэффициенты трения покоя
(σ = 75 МПа , V = 0,08 м/с)

№ п/п	Марки материалов контртел			
	ВТ 3-1	Сталь14Х17Н2	Сталь 45	Сталь ШХ15
1	0,052	0,045	0,029	0,027
2	0,055	0,043	0,035	0,030
3	0,057	0,047	0,038	0,032
4	0,057	0,050	0,030	0,033

Коэффициенты трения покоя убывают в ряду - титановый сплав, нержавеющая, конструкционная и подшипниковая стали. Причем стали марок 45 и ШХ15 имеют весьма близкие результаты. По-видимому, это связано со структурными особенностями исследованных сплавов. Наименьший уровень коэффициентов трения имеют покрытия на основе атласных тканей, а среди них - более толстое. Очевидно, что это определяется 100%-ным выходом фторопласта на рабочую поверхность покрытия и лучшими демпфирующими свойствами более толстого покрытия.

Выводы. 1. Для исследованных материалов контртел и покрытий в условиях проведенных экспериментов пусковой момент трения превышает стационарный на 6-9%.

2. Лучшими фрикционными пусковыми характеристиками обладает покрытие на основе шестиремизного неправильного атласа толщиной 0,53 мм в паре с контртелом из стали марки ШХ15.

3. Наименьший уровень пусковых характеристик обеспечивается трибосопряжениями на основе всех исследованных покрытий с контртелами из сталей марок 45 и ШХ15.

Библиографический список

1. *Кохановский В.А.* Идентификация металлополимерных трибосистем // Пластические массы. - 1997. - №6. - С.28-32.

2. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А.Белый, А.И.Свириденок, М.И.Петроковец, В.Г.Савкин. – Минск: Наука и техника, 1978. - 432с.

3. *Кохановский В.А.* Структура и свойства антифрикционных волокнитов / В.А.Кохановский // Безызносность II: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1992. - С.132-137.

Материал поступил в редакцию 27.03.08.

V.A.KOHANOVSKY, U.V. SIDELNIK-RUBANOVA

STARTING ADJECTIVES FOR METAL-POLYMERIC TRIBOSYSTEMS WITH COMPOSITION COVERAGE

Results of unseat moment investigations for metal-polymeric turning pairs are cited. Testing machine and testing technique are described. Fluent features of thermal and power load conditions to friction coefficient are descripted.

КОХАНОВСКИЙ Вадим Алексеевич (р. 1939), профессор (1997) кафедры "Технология конструкционных материалов" ДГТУ, доктор технических наук (1995). Окончил технологический факультет РИСХМа (1962).
Область научных интересов - трение и изнашивание, идентификация трибосистем, прогнозирование ресурса, надежность трибосопряжений.
Автор более 100 научных публикаций.

СИДЕЛЬНИК-РУБАНОВА Юлия Владиленовна, старший преподаватель кафедры "Безопасность жизнедеятельности" ДГТУ (2001). Окончила ДГТУ (1993) по специальности "Металлорежущие станки и инструменты".
Имеет 7 печатных работ в области трения полимерных композитов.

УДК 621.9

В.В. ИЛЯСОВ, А.А. РЫЖКИН, А.В. ИЛЯСОВ

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приводится методика расчёта износостойкости карбида вольфрама, фаз Лавеса, сверхструктур и композиционных материалов на их основе. Обсуждаются полученные результаты.
***Ключевые слова**: износостойкость, абразивный износ, система «карбид вольфрама - железо», металломатричный композит, покрытия*

Введение. Анализ видов износа поверхности изделий показал, что для выбора технологического процесса восстановления изношенной поверхности изделий важно знать механизм и кинетику процесса износа, что позволит выбрать наиболее рациональный метод их восстановления путём нанесения покрытий, соответствующий материал поверхностного слоя, его физико-химические свойства и финишную обработку. Мониторинг состояния проблемы показал, что наиболее характерным является механический износ поверхностей, характеризующийся потерей размеров и массы пар трения, который проявляется при износе прессового и режущего инструмента, насосных штоков, деталей горнодобывающей и землеройной техники и т.д. Наименее изучен абразивный и эрозионный износ поверхностей. Наиболее полная классификация видов износа поверхностей приведена в работах [1, 2]. Авторами работы [1] описаны методы нанесения и схемы формирования поверхностей внешних покрытий, состав материала покрытий и общее состояние проблемы. Для обеспечения поверхностной твёрдости и стойкости к абразивному изнашиванию деталей различного назначения разработаны разнообразные составы покрытий и методы их нанесения.

В последние годы ведутся разработки высокопроизводительных и дешевых методов получения на поверхности инструмента и технологической оснастки толстых покрытий на основе металломатричных композитов (ММК), содержащих карбиды (нитриды, бориды) тугоплавких металлов. К их числу можно отнести метод плазменной наплавки ММК, широко используемый для модификации свойств поверхности инструмента, работающего в условиях абразивного износа. Технология плазменной порошковой наплавки считается одним из наиболее экономичных и эффективных способов нанесения износостойких покрытий на стальные изделия. Следует отметить, что использование наплавки плазменной переносной дугой позволяет добавить тугоплавкие частицы (карбиды переходных металлов) непосредственно в расплав стальной основы композита, что приводит к увеличению износостойкости материалов покрытия на поверхности детали.

Постановка задачи. В настоящее время экспериментальных и теоретических данных, посвящённых изучению износостойкости металломатричных композиционных покрытий на основе системы Fe-W-C, в опубликованной литературе нами не установлено. В связи с этим планируется развить аналитическую модель абразивного износа на композиционные материалы, на основе которой изучить природу износостойкости металломатричных композитов и трибологические свойства покрытий разного состава.

Методика расчёта. Повышение износостойкости покрытий на основе металломатричного композита невозможно решить без научного прогнозирования их поведения в условиях трения, что предполагает дальнейшее изучение физико-химических процессов в зоне контакта и применение аналитических методов расчёта показателей износостойкости, которые отражают определенную физическую модель изнашивания [3-5]. Нами рассматривается механический износ поверхностей с потерей размеров и массы эксплуатируемых изделий, в частности абразивный износ. В сопоставлении с трением скольжения и трением качения механизм абразивного износа и его кинетика другие. По данным Г.Фирреге [6], абразивный износ проявляется в трибосистемах с равномерной интенсивностью во всем диапазоне температур в зоне контакта.

В данной работе использована физическая модель абразивного износа, развитая в работах [3-5,7], для процессов резания твёрдыми сплавами, учитывающая влияние механических и физико-химических характеристик материала покрытия. Авторы отмеченных выше работ, используя эмпирическую зависимость М.М. Хрущова [8], приближение Фриделя (для энергии химической связи) [9], модель Мотта (для диффузионной термоЭДС) [10-12] и ряд математических приближений [3-5], получили соотношение, связывающее относительную износостойкость с характеристиками электронной структуры

$$I_{отн} = b \cdot \left\{ \left(\int_{E_b}^{E_F - \Delta} E\, N(E)\, dE + \Delta \cdot E_F\, e^{\frac{\varepsilon E}{K_\varepsilon T}} + K_C + K_{H1} \right)^2 + K_{H2} \right\}, \quad (1)$$

где E - энергия состояния, Ридберг; $\mathrm{E_F}$ - энергия Ферми; $\mathrm{E_b}$ - энергия дна валентной полосы; Δ - энергетический интервал в окрестности уровня Ферми; $\mathcal{E}$ - абсолютная термоЭДС; Т -термодинамическая температура; $\mathrm{K_c}$ - энергия электронов всех атомов (соединения) в свободном состоянии, Ридберг; $K_{H1}\,(Рид),\ K_{H2}\,(ГПа)$ - варьируемые параметры; b - размерный коэффициент пропорциональности, $м^2/Н$.

В формуле (1) выражение в фигурных скобках, определяющее величину механической твёрдости материала, на наш взгляд, следует дополнить размерным коэффициентом «а»

$$H = \left(a \left\{ \int_{E_b}^{E_F - \Delta} E \cdot N(E)\, dE + \Delta \cdot E_F\, e^{\frac{\varepsilon E}{K_\varepsilon T}} + K_C + K_{H1} \right\} \right)^2 + K_{H2}\ , \quad (2)$$

где a – коэффициент, ГПа/Рид.

В этом случае достигаются следующие результаты: во-первых, устраняется несоответствие размерностей в (1); во-вторых, расширяются возможности построения корреляционных зависимостей между значениями твёрдости материала и энергии химической связи в нём. Последнее имеет особенно важное значение при расчёте сложных кристаллографических структур, в частности, фаз Лавеса и сверхструктур типа η-Me_6W_6C, формирующих композиционные материалы на основе системы Fe-W-C. С учётом сделанной поправки формула (1) принимает вид

$$I_{отн} = b \cdot \left\{ \left(a \left\{ \int_{E_b}^{E_F - \Delta} E \cdot N(E)\, dE + \Delta \cdot E_F\, e^{\frac{\varepsilon E}{K_\varepsilon T}} + K_C \right\} + K_{H1} \right)^2 + K_{H2} \right\}. \quad (3)$$

Данная зависимость связывает относительную износостойкость материала с параметрами его электронной структуры, в частности, с плотностью электронных состояний, энергией Ферми, числом заполнения электронами s, p и d-уровней, энергией связи атомов и абсолютной термоЭДС материала покрытия. Использование формулы (3) для оценки относительной износостойкости карбидных фаз предполагает использование одного из зонных методов расчёта плотности электронных состояний (ПЭС). В данной работе использован метод ПЛКП, описанный в работе [13].

Для тестирования данной методики для сложных кристаллографических объектов вычислены полная и локальные парциальные ПЭС изучаемых здесь карбидных систем, определены числа заполнения и уровень Ферми, вычислены энергия K_c и величина диффузионной термоЭДС. Выполненные оценки представлены в табл. 1. На первом этапе сопоставлены расчётные параметры для кубического карбида вольфрама со структурой типа NaCl [3-5] и гексагонального со структурой типа WC.

Таблица 1

Параметры расчёта, твёрдость и относительная износостойкость карбида вольфрама и сверхструктуры η-Fe_6W_6C

Фаза	K_c, Рид	K_{H1}, ГПа	K_{H2}, ГПа	E_F, Рид	ε, мкВ/К	H, ГПа	Относительная износостойкость, $I_{отн}$
WC (NaCl)	7.642	- 6.0	0.0	0.90	0.002100	23.570	330.450
WC (гекс.)	2.388	- 1.25	20.0	0.83	0.003497	24.182	339.026
η-Fe_6W_6C	11.909	- 1.25	10.0	0.23	0.005542	15.26	213.922

Анализ данных в табл. 1 позволяет отметить, что величины относительной износостойкости карбидов вольфрама в двух кристаллографических модификациях находятся в хорошем согласии с физическими представлениями. Как известно [14], кубическая структура карбида вольфрама (типа NaCl) формируется в области его гомогенности при дефиците углерода в соединении WC_{1-x}, что сопровождается обрывом ковалентных связей и, как следствие, приводит к меньшим значениям твёрдости. Поэтому как твёрдость, так и износостойкость гексагонального карбида вольфрама оказывается выше чем кубического WC, что и подтверждает данный расчёт. Полученные значения относительной износостойкости карбида вольфрама хорошо согласуются с оценкой М.М. Хрущова ($I_{отн}$ = 330.7 при твёрдости 24.696 ГПа [8]).

На втором этапе рассматриваемая методика применена к сверхструктуре типа η-Fe_6W_6C, для которой рассчитаны аналогичные параметры, представленные в табл.1. Основное затруднение здесь было обусловлено выбором расчётного кластера для моделирования сверхструктуры η-Fe_6W_6C, что связано с ограничениями метода ПЛКП для расчёта плотности состояний электронных подсистем атомов в сложных соединениях. Моделирование осуществлялось перебором более 10 различных конфигураций атомов, для каждой из которых выполнялся расчёт полной и локальных парциальных ПЭС, определены числа заполнения и уровень Ферми, вычис-

лены энергия K_c , величина диффузионной термоЭДС и энергия химической связи (на пару атомов W-C). В качестве параметра оптимизации использованы величины термоЭДС и энергии химической связи (энергия когезии) в приближении Фриделя. Последняя согласно известных физических представлений [15, 16] должна коррелировать с испытанием на твёрдость изучаемого материала. Оптимальное значение энергии когезии атомов W-C в сверхструктуре η-Fe_6W_6C составило величину 4.7 эВ/(на пару), что оказалось в 2.3 раза меньше чем в гексагональном карбиде вольфрама и не противоречит физическим представлениям и экспериментальным оценкам микротвёрдости данных соединений. Рассчитанные значения относительной износостойкости для сверхструктуры η-Fe_6W_6C составили величину $I_{отн}$=213.9 (при твёрдости 15.26 ГПа), что в 1.6 раз меньше относительно гексагонального карбида вольфрама.

Физическая модель износостойкости металломатричных композиционных материалов. Развитый выше подход был использован для оценки износостойкости всех карбидных фаз, составляющих металломатричный композит на основе системы Fe-W-C. Авторами [17] экспериментально установлено количественное содержание следующих структурных фаз: WC, FeW_3C, η-Fe_3W_3C, η-Fe_6W_6C, мартенсит. Для каждой фазы осуществлялось моделирование расчётного кластера перебором различных конфигураций атомов и определение расчётных параметров, используемых для оценки износостойкости в соответствии с соотношением (3). На рис.1 представлены кластеры атомов в соединениях FeW_3C, Fe_6W_6C и мартенсит, соответствующие оптимальным значениям термоЭДС и энергии когезии и не противоречащие экспериментальным данным и физическим представлениям.

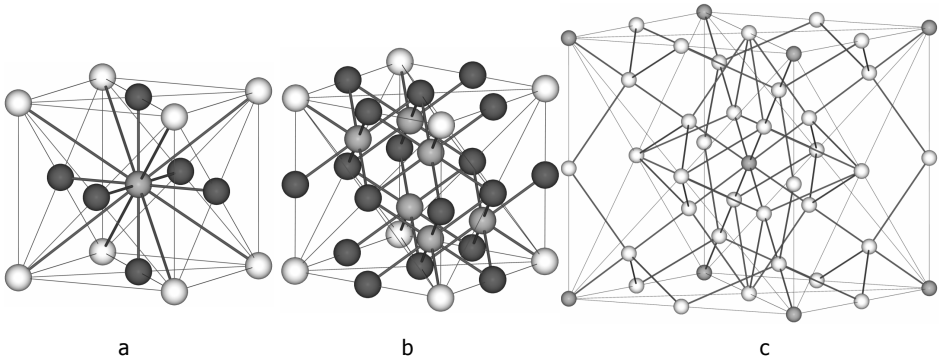


Рис.1. Расчётные кластеры карбидных систем FeW_3C (a), Fe_6W_6C (b) и мартенсита, моделируемого конфигурацией атомов Fe_2C_{22} (c)

При комнатной температуре кратчайшая длина связи атомов вольфрама и углерода в ряду WC → FeW_3C → Fe_3W_3C → Fe_6W_6C составляет d_0 ~ 2.220Å, 3.905Å, 3.064Å и 3.022Å соответственно, что определяет особенности их энергии химической связи, физические и механические свойства. Результаты расчёта износостойкости структурных фаз, образующих металломатричный композит, представлены в табл. 2 в сопоставлении с физическими и механическими характеристиками.

Следует отметить, что для теоретического расчёта трибологических свойств структурных фаз ММК использована физическая модель абразив-

ного износа, описанная в работах [3-5, 7], которая ранее использовалась только для бинарных ГЦК карбидов и их твёрдых растворов. В данной работе отмеченная физическая модель развита для нового класса кристаллографических структур: гексагонального WC, структуры Лавеса FeW_3C, сверхструктур типа η_1-Fe_3W_3C и η_2-Fe_6W_6C и мартенсита, моделируемого расчетным кластером Fe_2C_{22}. Расчётные значения износостойкости FeW_3C, η_1-Fe_3W_3C, η_2-Fe_6W_6C и Fe_2C_{22} карбидных систем получены впервые.

Таблица 2

Сопоставление энергии когезии и износостойкости с расчётными и экспериментальными значениями микротвёрдости в соединениях: карбид вольфрама, FeW_3C, Fe_3W_3C, Fe_6W_6C и мартенсит

Фаза	Энергия когезии $E_{св}$, эВ	Относительная износостойкость карбидных фаз $I_{отн}$	Микротвёрдость фаз $H_ц$, ГПа	
			н.р.	эксп.
Мартенсит	2.0	116.38	8.30	7.58
FeW_3C	2.7	146.35	10.43	-
Fe_3W_3C	4.2	207.10	16.36	14.93
Fe_6W_6C	4.7	213.92	15.26	-
WC	10.8	339.03	24.20	23.17

Для раскрытия природы формируемых трибологических свойств в рассмотренных соединениях были детально изучены их структурные и электронные свойства [18]. На основании данных работы [18] изучены особенности электронных подсистем карбидов: WC, FeW_3C, Fe_3W_3C, Fe_6W_6C и мартенсита, которые определяют структуру химической связи в них. Анализ распределения парциальных зарядов валентных электронов, представленных в табл. 3, показывает на доминирующую роль вкладов p- и d-электронов атомов железа и вольфрама. Сравнение электронных спектров FeW_3C и Fe_6W_6C позволяет обнаружить усиление гибридизации *p*- и *d*-электронов между атомами железа и вольфрама при увеличении содержания железа в соединении. Роль электронной конфигурации железа проявилась в образовании направленных Fep-Cs, Wp-Cs связей, определивших перестройку электронного энергетического спектра при переходе от исходного WC к сверхструктуре η_1-Fe_6W_6C.

Таблица 3

Распределение парциальных зарядов q валентных электронов подзоны UVB в карбидах: WC , FeW_3C, Fe_3W_3C, Fe_6W_6C и мартенсите

Фаза		q				
		s	p	d	∑spd	∑
WC	C	1.336	2.833	-	4.169	5.483
	W	0.131	0.228	0.955	1.314	
FeW_3C	C	1,605	0,932	-	2.537	17.356
	Fe	0,434	3,959	6,266	10.659	
	W	0,194	2,681	1,285	4.160	
Fe_3W_3C	C	0.798	1.558	-	2.356	
	Fe	0.427	7.968	0.179	8.574	14.000
	W	0.430	2.113	0.527	3.070	
Fe_6W_6C	C	0,229	0,399	- 10,973	0.628	
	Fe	0,676	1,958	0,910	13.607	26.000
	W	0,190	10,665		11.765	
Мартенсит	C	1,266	6,704	- 18,982	7.970	27.986
	Fe	0,576	0,458		20.016	

Анализ полученных результатов позволяет установить ряд закономерностей в изменении электронной энергетической структуры, физических и механических свойств исследуемых карбидных систем. В частности, при переходе WC→ Fe_3W_3C→ Fe_6W_6C происходит уменьшение более чем в 2 раза энергии когезии $E_{св}$ и 1.6 раза значений микротвёрдости H_μ, а также наблюдается снижение в 3 раза величины модуля всестороннего сжатия B_0 [18]. Графическая интерпретация полученных результатов (рис.2) позволяет констатировать наличие зависимости между изменением энергии химической связи как параметра электронной структуры и значениями микротвёрдости в ряду WC → FeW_3C → Fe_3W_3C → Fe_6W_6C → мартенсит.

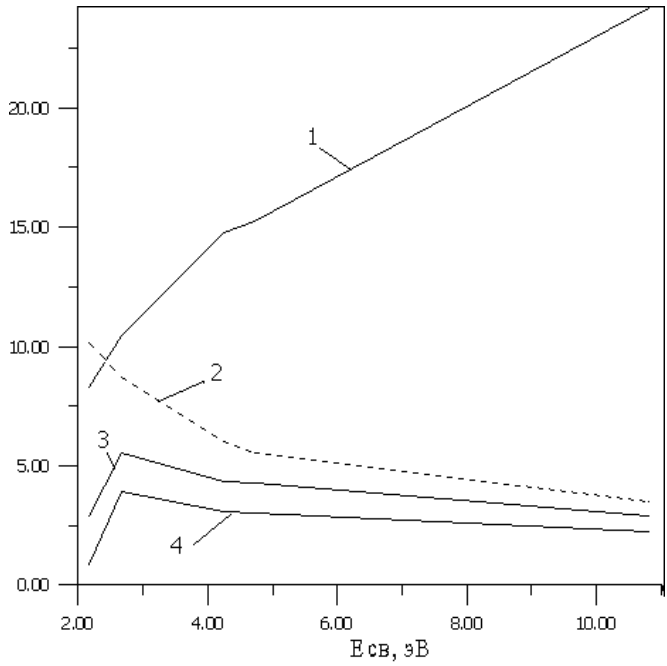


Рис. 2. Расчётные зависимости микротвёрдости Hμ в ГПа (1), термоЭДС ε ·10^3 в мкВ/град (2), длины связи d в Å (3) и параметра элементарной решётки в Å (4) от энергии когезии

В интервале (4.2÷10) эВ значений энергии химической связи, соответствующему ряду Fe_3W_3C → Fe_6W_6C → WC, для микротвёрдости наблюдается прямая пропорциональность. В этом же интервале энергий связи значения термоЭДС, длины связи и параметра решётки имеют обратно пропорциональную зависимость.

Известно [19], что структурно-чувствительным параметром наряду с другими могут служить величина и знак термоЭДС. Последние определяются характером распределения ПЭС в окрестности уровня Ферми в соответствии с моделью Мотта [11]. Трактовка кривых 1 и 2 (см. рис.2) с этих позиций позволяет высказать заключение о том, что структуры мартенсита и фазы Лавеса FeW_3C имеют в два раз большую степень беспорядка (из сопоставления величин термоЭДС), чем карбиды ряда Fe_3W_3C → Fe_6W_6C → WC. Данное утверждение согласуется с физическими представлениями и экспериментальными данными и может быть проиллюстрировано рис. 3. Анализ приведённых выше результатов показывает, что с увеличением

значений термоЭДС соответствующей карбидной фазы наблюдается уменьшение износостойкости и модуля объёмного сжатия, что согласуется с экспериментальными данными по износостойкости.

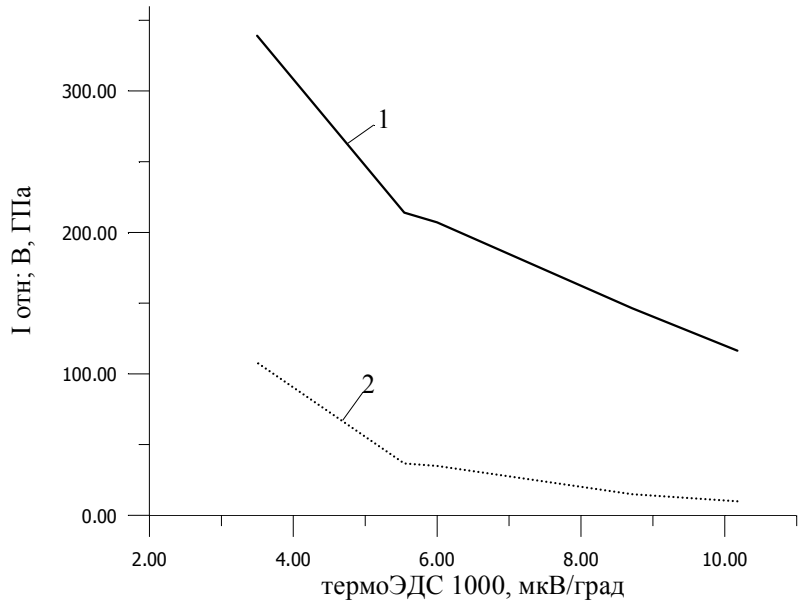


Рис. 3. Корреляционные зависимости износостойкости $I_{отн}$ (1) и модуля всестороннего сжатия B_0 (2) от величины термоЭДС ε карбидных фаз

Физическое обоснование экспериментально обнаруженных фактов взаимосвязи между показателями износостойкости и величиной абсолютной термоЭДС материала (характеристики электронного строения), выполненное ранее в работах [3-5, 7], получило в настоящей работе дальнейшее развитие.

Отметим, что энергия когезии определяется состоянием электронных подсистем и длиной связи между атомами в соединении, обусловленной их конфигурацией, и поэтому может выступать важной характеристикой структурных и электронных свойств материала, взаимосвязанной в свою очередь с показателями износостойкости материала.

При моделировании физических, механических и трибологических свойств металломатричного композита на основе системы Fe-W-C использованы подходы и методики, развитые в работах [3-5, 7, 20]. В рамках адиабатического приближения и по аналогии с работой [20] для оценки величины микротвёрдости и относительной износостойкости металломатричного композита, составленного из погруженных в мартенсит карбидных фаз, взяты соотношения из [21, 22], использующие весовой коэффициент каждой фазы:

$$H = \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot H_i , \qquad (4)$$

где H - микротвёрдость i-й фазы; k- массовый коэффициент фазы; i - тип фазы;

$$I_{отн} = \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot I_{отн,\ i}\ , \qquad (5)$$

где $I_{отн}$ - относительная износостойкость металломатричного композита, $I_{отн,i}$ - относительная износостойкость *i*-й фазы.

Таким образом, износостойкость металломатричных композиционных материалов, составленных из рассмотренных выше карбидных фаз, определяется как сумма парциальных износостойкостей отдельных фаз, нормированных на количественное содержание фаз в композите. Последнее может быть установлено рентгенофазовым анализом. Рассчитанное значение относительной износостойкости металломатричного композиционного материала на основе 40% ПМ сталь + 60% WC составило величину порядка $I_{отн}$ = 174,5, что оказалось почти в 2 раза меньше, чем у гексагонального карбида вольфрама.

Моделирование трибологических свойств металломатричных композиционных покрытий. Расчётные значения износостойкостей металломатричных композиционных покрытий для разных исходных составов, полученные на базе развитой выше физической модели, приведены в табл.4 в сопоставлении с экспериментальными значениями интенсивности износа. Анализ данных, представленных в табл.4, позволяет сделать заключение об адекватности расчётных значений микротвёрдости и относительной износостойкости экспериментальным данным по абразивному износу металломатричных композиционных материалов на основе системы Fe-W-C.

Таблица 4

Взаимосвязь исходного состава композиции с микротвёрдостью, относительной износостойкостью и интенсивностью абразивного износа металломатричного композиционного материала

Исходная композиция ПМ сталь + WC	Микро-твёрдость Н, ГПа	Относительная износостойкость ММК $I_{отн}$	Интенсивность износа ММК, мг/км
35% ПМ сталь + 65% WC	16,171	226,717	1119.880
40% ПМ сталь + 60% WC	12,443	174,454	1213.203
40% ПМ сталь + 30% WC + 30% W_2C	10,732	150,467	1313.028

Таким образом, применение описанной выше аналитической модели взаимосвязи физических свойств с износостойкостью позволяет выполнять оценки характеристик износостойкости не только для сложных соединений типа сверхструктур, но и для металломатричных композиционных материалов, например, на основе системы Fe-W-C.

Библиографический список

1. *Бобров Г.В.* Послеэксплуатационное восстановление поверхностей изделий нанесением неорганических покрытий / Г.В. Бобров, А.А.Ильин, Л.М.Петров // Технология ремонта, восстановления и упрочне-

ния деталей машин, механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки: мат. 8-й Междунар. практ. конф. 10-13 апр. 2006 г. Ч. 1.- СПб.: ИПТУ, 2006.-С. 98-119.

2. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект) / А.А.Рыжкин. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004.- 323с.

3. *Илясов В.В.* Физико-химические основы создания новых твердых и сверхтвердых инструментальных материалов: дис.… д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.04. – Ростов-на-Дону, 2000. - 348 с.

4. *Илясов Ю.В*. Влияние состава твёрдых сплавов на износ при резании металлов: дис… канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.04. – Ростов н/Д, 2005. - 130 с.

5. *Рыжкин А.А.,* Илясов В.В. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов // Вестник машиностроения. - 2000. - №12. – С. 32-40.

6. *Vierrege G.* Zerspanung der Eisenwerkstoffe.-Verlag Stahleisen.-2. Auflage.- Düsseldorf, 1970. - S. 81-83.

7. *Рыжкин А.А.,* Илясов В.В., Илясов Ю.В. Оценка абразивного износа инструментальных материалов // Вестник ДГТУ. Сер.Трение и износ.- Ростов н/Д. - 2000.- С.13-22.

8. *Хрущов М.М.* Закономерности абразивного изнашивания//Износостойкость. / М.М. Хрущов. - М.: Наука, 1975.-С. 5-28.

9. *Fridel J.* The Physics of Metals I., edited by J.M.Ziman (Cambridge University Press, Cambridge, 1969).

10. *Каролик А.С.,* Голуб В.М. Расчет электронных свойств парамагнитных Cu-Ni сплавов методом ППВ в приближении виртуального кристалла//ФММ. 1997. Т.83. Вып. 5. - С. 5-13.

11. *Mott N.F.* The Resistance and Thermoelectric Properties of the Tansiti on Metals//Proc.Roy.Soc. 1936. A156. - P. 368-382.

12. *Блатт Ф.Дж.* Термоэлектродвижущая сила металлов. / Ф.Дж. Блатт, П.А.Шредер, К.Л.Фойлз, Д.Грейг: пер. с англ.; под ред. Д.К. Белащенко. - М.: Металлургия, 1980. - 248 с.

13. *Илясов В.В,* Сафонцева Н.Ю., Никифоров И.Я. Электронная структура и природа химической связи нитрида бора в сфалеритной модификации //ФТТ. - 1994. - Т.2. - № 2. - С. 451-459.

14. *Курлов А.С.,* Гусев А.И. Фазовые равновесия в системе W – C и карбиды вольфрама // Успехи химии.- 2006.- 75. - № 7.- С. 687-708.

15. *Григорович В.К.* Твердость и микротвердость. / В.К. Григорович. - М. : Наука, 1976. – 230 с.

16. *Харрисон У.* Электронная структура и свойства твердых тел / У. Харрисон // Физика химической связи. - М.: Мир, 1983. - Т.1. – 381 с.

17. *Илясов А.В.,* Рыжкин А.А., Илясов В.В. Особенности фазообразования при кристаллизации расплава системы Fe-W-C после осаждения в потоках плазмы // ФХОМ.-2007.- № 4.- С. 21-24.

18. *Илясов А.В.,* Рыжкин А.А. Особенности электронной структуры карбидных систем Fe_3W_3C и WC при их кристаллизации из расплава Fe-W-C// 9-й Междунар. симпозиум «Упорядочения в металлах и сплавах». -ОМА-9. – Ростов н/Д, п. Лоо, 12-16 сент.2006 г.: тр. симпозиума. Ч.1.- Ростов-н/Д: Изд-во РГПУ, 2006.- С. 192-195.

19. *Рыжкин А.А.* Трибоэлектрические явления и износ инструментальных материалов / А.А. Рыжкин // Надежность и эффективность станочных и инструментальных систем: сб. науч. тр.- Ростов-н/Д, 1998.-С. 9-51.

20. *Ilyasov V.,* Ryzhkin A., Ilyasov Yu. Prospects of computer modelling for a level of wear resistance of PM hard materials on the basis WC-Fe-Ni //Powder Metallurgy Progress, 2002, Vol.2, No/1, P.44-53.

21. Перспективы метода плазменной наплавки износостойких металломатричных композитов на поверхности инструмента и технологической оснастки / А.В. Илясов, А.А. Рыжкин, В. Тайзен и др. // Технология ремонта, восстановления деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: мат. 8-й Междунар. практ. конф.-выставки: В 2 ч. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 45-50.

22. *Ilyasov A.,* Ryzhkin A., Ilyasov V. Structure and phase transitions of some crystals in the systems Fe-WC after discrete plasma influence // Proceeding of the European crystallographic conf. ECM-23 2006, 6-11 Aug.- Leuven, Belgium, 2006.- P. 193.

Материал поступил в редакцию 20.04.08.

V.V. ILYASOV, A.A. RYZHKIN, A.V. ILYASOV

PHISICAL MODEL WEAR RESISTANCE OF METAL MATRIX COMPOSITE MATERIALS

It is given to the method calculation of wear resistance of WC, phase Laves, superstructure and composite materials on their basis. Received results are discussed.

ИЛЯСОВ Виктор Васильевич (р.1945), доктор технических наук (2001), профессор кафедры «Физика» Донского государственного технического университета. Окончил физический факультет РГУ (1973).
Научные интересы: компьютерное материаловедение, квантовая химия твёрдого тела, рентгеновская спектроскопия, электронная и кристаллическая структуры нитридов группы A^3B^5 и карбидов переходных металлов, воздействие мощных потоков энергии на материалы, изучение структуры и свойств наноструктурированных материалов, трибология.
Автор 160 научных статей и авторских свидетельств СССР.

РЫЖКИН Анатолий Андреевич (р.1938**)**, зав.кафедрой «Инструментальное производство» (1986), доктор технических наук (1985), профессор кафедры «Инструментальное производство» (1985). Окончил РИСХМ (1960) по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования.
Научные интересы: термодинамика трения и изнашивания, исследование синергетических процессов при трении применительно к резанию материалов, оптимизация резания, оптимальные технологии комбинированного упрочнения инструментальных материалов.
Автор более 350 научных трудов, в том числе 6 монографий, 2 учебных пособия и 4 авторских свидетельства СССР. Под его руководством защищено 5 докторских и 16 кандидатских диссертаций.

ИЛЯСОВ Алексей Викторович (р.1981), аспирант 3-го года обучения кафедры «Инструментальное производство» ДГТУ. Окончил ДГТУ (2004).
Лауреат премии Губернатора Ростовской области (2003), Грант Президента Российской Федерации для научной стажировки за рубежом (2005/06 года).
Научные интересы: теоретическое моделирование основы композиционных материалов с прогнозируемыми функциональными свойствами, исследование взаимосвязи износостойкости и электронной структуры материалов.
Автор - 20 печатных работ, в том числе в международных научных журналах и трудах конференций.

УДК 621.9.048.6

В.С. МИНАКОВ, Д.А. ЧИЛИКИН, Д.Н. МАЛЕЕВ

ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В данной работе рассмотрена возможность нанесения защитных износостойких покрытий, используя дискретную технологию ЭЛАН (электроакустическое напыление) с целью восстановления геометрии и упрочнения формообразующего инструмента без съема со станка.
Ключевые слова: *электроакустическое напыление (ЭЛАН), восстановление, формообразующий инструмент.*

Введение. Постоянно меняющаяся экономическая ситуация выдвигает на первый план задачи по созданию экономически эффективного производства. В рамках этой задачи имеется ряд проблем, важность которых в научном и техническом плане, несмотря на постоянное решение этих вопросов, продолжает оставаться актуальной. К таковым можно отнести повышение общего уровня прочности, износостойкости и надежности металлорежущего инструмента. Значимость решения этих проблем приобретает особую остроту в связи с широким внедрением в машиностроение жаропрочных и труднообрабатываемых материалов, что в конечном итоге приводит к росту себестоимости механической обработки практически во всех отраслях машиностроения.

Известно, что в процессе работы формообразующего инструмента наиболее нагруженным является рабочая поверхность, соприкасающаяся со стружкой и изделием.

Постановка задачи. Одним из путей повышения износостойкости и производительности металлообработки является нанесение и восстановление защитных износостойких покрытий на указанные выше поверхности формообразующего инструмента, обладающие высокими характеристиками прочности и износостойкости без съема со станка. Известны различные способы нанесения защитных покрытий, но они не позволяют наносить их без предварительной подготовки, без съема инструмента со станка и без последующей переточки.

Защитные покрытия в предлагаемой нами технологии дискретного управления износостойкости формообразующего инструмента наносятся в момент перемещения инструмента на холостом ходу, т.е. в момент отвода инструмента в магазин или исходную точку после завершения операции механической обработки.

Одним из способов нанесения защитных покрытий, отвечающих указанным выше требованиям, является электроакустическое напыление (ЭЛАН).

В основе метода ЭЛАН [1,2] лежит использование высококонцентрированных потоков энергии электрической искры и продольно-крутильных комплексных ультразвуковых колебаний.

Методы испытаний. Для подтверждения возможности дискретного управления износостойкостью формообразующего инструмента при помощи метода ЭЛАН была создана экспериментальная установка, состоящая из

блока управления подачей разрядных импульсов, силового источника питания, ультразвукового генератора, акустической системы (магнитострикционный преобразователь с продольно-крутильным волноводом) (рис.1), токарно-винторезного станка с установленной на него акустической системой (рис.2).

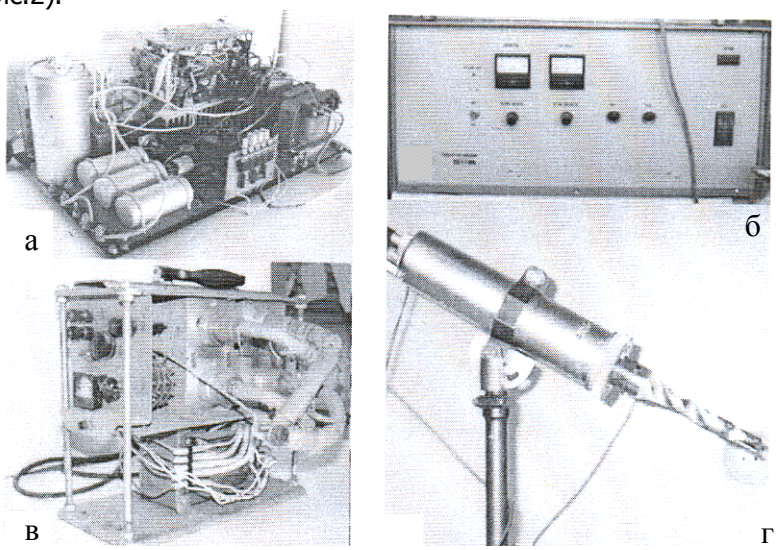


Рис.1. Лабораторная установка ЭЛАН: а - блок управления подачей разрядных импульсов; б - силовой источника питания; в - ультразвуковой генератор; г - акустическая система (магнитострикционный преобразователь с продольно-крутильным волноводом)

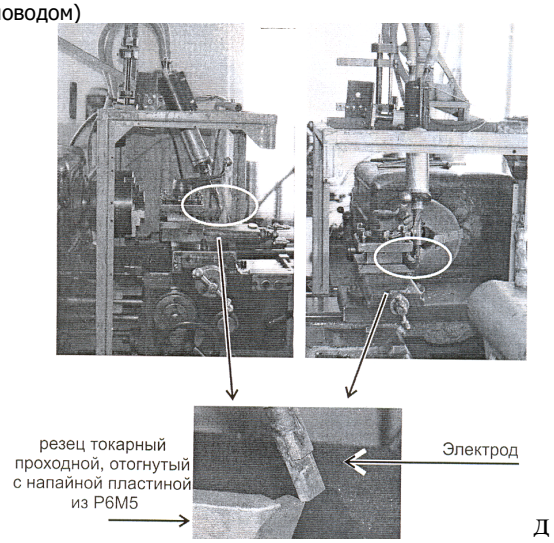


Рис.2. Экспериментальная установка ЭЛАН: д - токарно-винторезный станок с установленной на нем акустической системой

Выбрав режимы напыления и рассчитав режимы резания, был произведен эксперимент на износостойкость формообразующего инструмента. При выборе материалов образцов для экспериментальных исследований принимались во внимание те, которые наиболее часто используются в промышленности. Были выбраны резцы (в количестве 12 штук из одной

партии) токарные проходные, отогнутые с напаянной пластиной из Р6М5. Материал заготовки сталь 45.

В ходе эксперимента при обработке заготовки на токарном резце образуется нарост (рис.3), который наблюдали в микроскоп Webbers G50s оптического типа (диапазон увеличения от 10 до 600 раз). Известно, что нарост негативно сказывается на процесс обработки и, как нами установлено, также на процесс дискретного управления износостойкостью.

На рассчитанных режимах (табл. 1) производили исследования по одновременному удалению наростообразования и восстановлению напыленного слоя методом ЭЛАН. После одного прохода резец подвергался повторному напылению, как указанно выше.

Таблица 1

Режимы резания на станке 16К20

Параметры	Единицы измерения	Значения
Скорость резания	м/мин	65,3
Продольная подача	мм/об	0,12
Глубина резания	мм	0,5

Напыление производили при частоте продольно-крутильных колебаний 22 кГц, амплитуде колебаний 10 мкм и напряжении разрядных импульсов 10,1 (В). Материал электрода ВК8.

Результаты эксперимента. В ходе эксперимента производилось восстановление геометрии формообразующего инструмента нанесением защитных покрытий. При этом происходило удаление наростообразования (рис.3,4).

На рис.3, 4 представлены снимки резца по задней грани совмещенные при помощи ЭВМ. Произведен подъем линии износа (нижняя линия) и наложение линии начальной геометрии инструмента (верхняя линия).

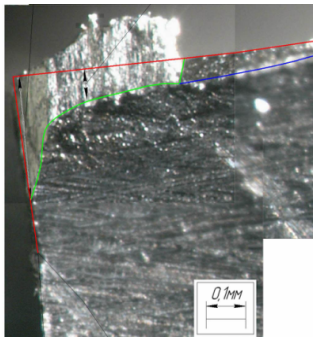


Рис.3. Вид по задней грани после обработки до напыления

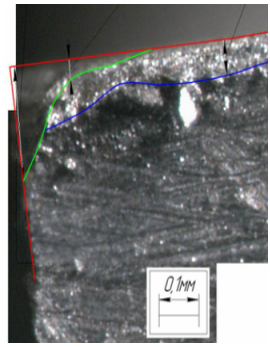


Рис.4. Вид по задней грани после обработки и напыления

Удаление наростообразования, по нашему мнению, связано с ударным воздействием ультразвуковых продольно-крутильных колебаний.

Выводы. Проанализировав полученные результаты, приходим к выводу, что восстановление формообразующего инструмента при помощи технологии ЭЛАН без съема инструмента со станка возможно. Однако необходима более глубокая проработка этого технологического процесса.

Библиографический список

1. А.с.102124 (СССР) М кл^{3} В23Р 1/18. Способ электроискрового нанесения покрытий/ В.С. Минаков, В.С. Богданов, Е.И. Бабинцев и др. (СССР).-№ 3317570/25-08, - Заявл. 17.07.81. – Опубл. 07.03.83. -№ 9. –с.81
2. Минаков В.С. Разработка комплексных механических и электрофизических процессов обработки на основе использования энергии трансформируемых ультразвуковых колебаний: дис…д-ра техн. наук: 05.03.01. - Ростов н/Д, 1989. – 516 с.

Материал поступил в редакцию 3.03.08.

V.S. MINAKOV, D.A. CHILIKIN, D.N. MALEEV

DISCRETE CONTROL OF FORM-BUILDING TOOL WEAR RESISTANCE.

In the given work with purpose of geometry restoration and hardening of the form-building tools without removing from the machine tool considered the opportunity of protective wear resistance coatings production using discrete ELAC technology (electro-acoustic coating).

МИНАКОВ Валентин Степанович (р. 1936), доктор технических наук (1989), профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета.
Область научных интересов - ультразвуковые процессы и технологии.
Автор 93 научных публикаций.

ЧИЛИКИН Денис Алексеевич (р. 1983), аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета.
Область научных интересов - ультразвуковые процессы и технологии.
Автор 5 научных публикаций.

МАЛЕЕВ Данил Николаевич (р. 1985), магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета.
Область научных интересов – ультразвуковые процессы и технологии.
Количество публикаций – 2.

УДК: 538.1.04: 539.124

М.Х.СЕРГЕЕВА, В.А.КОХАНОВСКИЙ

НАНОСТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматриваются нанотехнологии, повышающие износостойкость твёрдых сплавов, быстрорежущих сталей и полимерных композитов.
Ключевые слова: *радиационная обработка, ионная имплантация, износостойкость.*

Введение. Значительные технологические перспективы использования в промышленности наноструктурных материалов послужили существенным толчком развития современных нанотехнологий. В области триботехники, когда все основные физико-механические процессы сосредоточены в контактной зоне, наиболее перспективным представляются нанотехнологии, модифицирующие поверхность твёрдых тел.

В данной работе используется такой известный метод получения наноструктурных плёнок, как ионное осаждение [1] в виде его вариантов: электронно-лучевой обработки и имплантации [2].

Постановка задачи. Основной целью, описанных ниже экспериментальных исследований, является повышение износостойкости трибосистем путём наномодификации их поверхности. Высокая эффективность нанотехнологий позволяет повысить износостойкость как материалов лезвийных режущих инструментов, так и полимерных антифрикционных композитов в металлополимерных трибосистемах.

Методика исследований. В качестве объектов, поверхность которых подвергалась модификации, использовались неперетачиваемые твёдосплавные пластины (формы 02114-100612), спиральные свёрла из быстрорежущей стали диаметром 3 мм и полимерный препрег для антифрикционных покрытий подшипников скольжения. Все режущие инструменты обрабатывались по задней грани.

Условия поверхностной наномодификации приведены в табл.1, где обозначено: E – энергия; D – доза; I – ток; τ - время.

Таблица 1

Модифицируемые материалы и условия их обработки

№ п/п	Модифицируемый материал	Реагент	Оборудование	Среда	Режим обработки
1	Т15К6	Электроны высоких энергий	Ускоритель ЭОЛ - 2	Газообразный азот	E = 0,4МэВ , I = 35 мА,
2	ВК8				
3	Р6М5				
4	Т15К6	Ионы WC	Имплантатор МИР - 2	Вакуум 2×10^{-5} Па	E = 80 МэВ, D = 10^{17}ион/см^2, τ = 35 мин
5		Ионы Cu			
6	Р6М5	Ионы WC			E = 90 МэВ, D = 10^{17}ион/см^2 τ =25 мин
7		Ионы Cu			
8	Полимерный препрег				E = 20…80 МэВ D=3,7..12,7ион/см2 τ =10…34 мин

В качестве ионов, имплантируемых в инструментальные материалы, были выбраны ионы карбида вольфрама WC как наиболее твёрдого и износостойкого и ионы меди как существенно снижающие теплонапряженность режущих кромок в связи с высокой теплопроводностью меди.

В препрег полимерного композита имплантировались ионы меди с целью увеличения теплопроводности и повышения возможности реализовать режим избирательного переноса при трении.

После поверхностной обработки проводились сравнительные (до и после) стойкостные испытания инструментов в широком диапозоне режимов резания. Подшипники с модифицированным покрытием проходили испытания на специальном стенде вращательного движения, созданного на базе токарно-винторезного станка модели ТВ-4.

Стойкостные исследования проводились по ускоренной методике при времени резания 10-20 мин. [3]. Режимы всех исследований на износостойкость приведены в табл.2, где обозначено: V – скорость резания; S – подача; t – глубина резания; L – глубина сверления. Порядковые номера материалов во всех таблицах идентичны.

Таблица 2

Условия исследования модифицированных материалов

№ п/п	Модифицированный материал	Тип испытаний	Контактный материал	Режим испытаний
1	Т15К6	Наружное точение	Сталь 45	V = 80-180 м/мин, S = 0,11-0,43мм/об, t =0,5-2,0 мм
2	ВК8		Чугун СЧ-18	
3	Р6М5	Сверление глухих отверстий	Сталь 45	V = 8,3 м/мин, S – ручная, L = 10 мм
4	Т15К6	Наружное точение		V = 50-150м/мин, S= 0,11-0,43мм/об, t = 0,5-1,5мм
5				
6	Р6М5	Сверление глухих отверстий		V = 8,3м/мин, S – ручная, L = 10 мм
7				
8	Полимерное покрытие	Трение скольжения	Сталь ШХ15	V = 0,214 м/с, P = 13 МПа

Результаты исследований. Все исследованные материалы после наномодификации поверхности повысили свою износостойкость (табл.3). Однако повышение износостойкости поверхности модифицированных материалов имеет различную величину и физическую природу.

Так, облучение твёрдосплавных пластин электронами высоких энергий в среде азота образует на облученной поверхности тонкий мелкозернистый нетравящийся белый слой. Идентификация структурных изменений в этом слое при использовании рентгеновского дифрактометра ДРОН–2 показала наличие пиков окислов и нитридов вольфрама и титана при значительном аморфном гало. Поскольку облучение проводилось в среде азота, присутствие окислов может быть объяснено адсорбированным кислородом на поверхности пластин. Размеры зёрен в поверхностном слое твёрдого сплава сильно уменьшены. В пластинах из ВК8 после облучения размеры зёрен уменьшились в среднем на 31,8 % и достигли 1 мкм.

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований

№п/п	Модифицированный материал	Тип модификации	Параметр сравнения	Улучшение параметра в %
1	Т15К6	Облучение электронами высоких энергий	Стойкость в минутах резания (в числе обработанных деталей)	32,2 (61,3)
2	ВК8			24,1
3	Р6М5			36,3
4	Т15К6	Имплантация ионов WC		103,9
5		Имплантация ионов Cu		89,2
6	Р6М5	Имплантация ионовWC		2,4
7		Имплантация ионов Cu		2,25
8	Полимерное покрытие		Ресурс в часах	11,7

Следует отметить неравномерность повышения стойкости. Стойкость пластин с низким значением микротвёрдости (1499,7) повысилась значительно меньше (на 5-12%), чем стойкость с более высоким её значением (1761,9). Это обстоятельство увеличило вариации стойкости в выборке (N =60) радиационно обработанных пластин. Кроме того, стойкость, оцененная величиной износа по задней грани (см. табл.3), существенно меньше технологической стойкости, оцененной количеством реально обработанных деталей в заводских условиях.

Радиационная обработка свёрл из быстрорежущей стали также дала существенное повышение стойкости. Сравнение микротвёрдости образцов-свидетелей при нагрузке 100Н до и после облучения показало увеличение её на 180 %.

Вторым исследованным методом модификации поверхностного слоя контактирующих элементов трибосистем является ионная имплантация, повышающая износостойкость гораздо интенсивнее, чем радиационная обработка (см.табл.3).

Сравнительные стойкостные исследования показали, что имплантация ионов карбида вольфрама вызывает на 16,5 % большее повышение средней стойкости, чем имплантация ионов меди. Однако, учитывая естественный разброс (до 30 раз [3]) характеристик пластин, считаем, что разница в стойкости находится в пределах ошибки опыта. Следовательно, повышение стойкости связано очевидно не столько с типом имплантированных ионов, сколько с общим эффектом воздействия нанотехнологий, проявляющимся в общем увеличении межфазных границ [1,4].

Для выяснения физической сущности повышения стойкости пластинки были классифицированы на группы стойкости, и в каждой группе была измерена микротвёрдость (табл.4).

Таблица 4

Микротвёрдость пластин Т15К6 (p=100Н)

Стойкость	Высокая	Средняя	Низкая	Имплантация
Микро-твёрдость	2013	1973	1921	Отсутствует
	2147	1760	1158	Ионы WC
	1933	1202	1067	Ионы Cu

Анализ данных, представленных в табл.4, позволяет сделать заключение о том, что определяющим в повышении стойкости при имплантации является не микротвёрдость, а, по- видимому, повышение вязкости разрушения кобальтовой связки твёрдого сплава. Подобное явление отмечено в работе [4].

Имплантация ионов WC и Cu в заднюю поверхность свёрл повысила их стойкость в 2,25-2,4 раза. Это существенно превышает эффект от радиационной обработки (см.табл.3), хотя при этом микротвёрдость, повидимому в связи с увеличением пластичности, осталась практически на прежнем уровне или понизилась, как в случае с имплантированными ионами меди (см. табл.4).

Выполненные стойкостные экспериментальные исследования показали, что все инструменты уменьшают начальные износы и увеличенные периоды стационарного изнашивания. Это косвенно подтверждает сосредоточение наномодифицированного материала в весьма тонком поверхностном слое.

Полимерный препрег композиционных антифрикционных покрытий для подшипников скольжения в качестве антифрикционного компонента содержит фторопластовые нити «полифен». При облучении препрега ионным потоком параллельно протекают два противоположных процесса: радиационная деструкция фторопласта и повышение ресурса в результате влияния ионов меди. Оптимальными режимами имплантации, установленными экспериментально, является ускоряющее напряжение E = 20кВ при времени экспозиции τ = 10-15 мин.

Анализ кривых износа показывает, что рост ресурса полимерных покрытий происходит в основном за счет сокращения приработочных характеристик: начального износа и времени приработки.

Выводы. Радиационная обработка и ионная имплантация являются высокоэффективными методами повышения износостойкости самых разных материалов - твёрдых сплавов, легированных инструментальных сталей и полимерных композитов. Повышение износостойкости обеспечивается изменениями поверхностных структур, проявляющимися в измельчении структурных зёрен, увеличении вязкости разрушения и, в ряде случаев, твёрдости.

Применение методов ионного осаждения для повышения износостойкости полимерных материалов требует подбора режимов для оптимизации дозы облучения (ион/см^2), варьирующейся в зависимости от природы полимера.

Библиографический список

1. *Андриевский Р.А.* Наноструктурные материалы. / Р.А. Андриевский, А.В.Рагуля. - М.: ACADEMA, 2005. - 192 с

2. *Диденко А.Н..* Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. / А.Н. Диденко, А.Е.Лигачёв, И.Б.Куракин. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 184 с.

3. *Владимиров В.В.* Исследование износостойкости инструментальных материалов после радиационной обработки. / В.В. Владимиров, Н.С.Колев, М.Х.Сергеева. и др. // Промышленные ускорители и радиационная технология: сб. ст. - М.: РИАН СССР, 1983 . - С. 59-65.

4. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований; под ред. М.К.Роко, Р.С.Уильямса, П.А.Аливисатоса: сб. ст. - М.: Мир, 2002. - 292 с.

Материал поступил в редакцию 17.03.08.

M.H. SERGEEVA, V.A. KOHANOVSKY

SURFACE NANO LEVEL STRUCTURAL MODIFICATION

Nano level technologies for wear resistance increase were considered for Different materials: cemented carbides, high speed steels and polymer composites.

СЕРГЕЕВА Марианна Христофоровна, доцент кафедры «Управление качеством» (2006) ДГТУ, кандидат технических наук (1986),
Автор более 70 научных публикаций в области надежности систем.

КОХАНОВСКИЙ Вадим Алексеевич (р.1939), доктор технических наук (2005), профессор кафедры «Технология конструкционных материалов» (2006).
Автор более 150 научных публикаций в области трения и изнашивания.

УДК. 621.365.+785.539+179.1

А.Н. СИМОНЕНКО, Д.М. КУЗНЕЦОВ, С.А. ПАШКО

МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА «СТАРЕНИЯ» РАСПЛАВА СОЛЕЙ ПРИ КАРБОТИТАНИРОВАНИИ В ИНДУКЦИОННЫХ СОЛЯНЫХ ПЕЧАХ-ВАННАХ

Рассмотрено исследование процесса карботитанирования в многокомпонентном расплаве солей в высокочастотном электромагнитном поле. Экспериментально показана возможность контроля «старения» расплава солей с помощью метода акустической эмиссии.
Ключевые слова: *химико-термическая обработка (ХТО), индукционная соляная ванна, «старение» расплава солей, акустическая эмиссия.*

Введение. Известно, что диффузионное титанирование позволяет значительно повысить коррозионную стойкость, кавитационную стойкость, твердость и износостойкость сталей. Однако одним из существенных недостатков диффузионного титанирования является большая длительность процесса насыщения [1].

Опыт промышленного использования для ХТО индукционных соляных печей-ванн (ИВС) показал значительное сокращение времени диффузионного насыщения [2]. Поэтому для интенсификации процесса титанирования рационально использовать ИВС. Поскольку при насыщении в ИВС происходит принудительное науглероживание обрабатываемых сталей, то процесс титанирования по сути является карботитанированием.

Ранее было установлено [3], что при ХТО в ИВС наблюдается процесс «старения» расплава солей, что в значительной мере сказывается на результатах ХТО — структуре, фазовом составе, толщине слоя и др.

Известно, что эксплуатационные свойства титановых слоев в значительной степени зависят от перечисленных выше параметров, поэтому при проведении карботитанирования необходимо строго контролировать процесс «старения» расплава солей.

В настоящее время контроль процесса «старения» на производстве осуществляется по микроструктуре образцов-«свидетелей», обрабатываемых совместно с деталями. Однако этот способ длителен, трудоемок и не обеспечивает постоянного контроля работы соляной ванны.

В научной литературе имеются сведения о применении метода акустической эмиссии (АЭ) для исследования фазовых превращений в металлах и сплавах. Имеются также сведения об эффектах, которые происходят в жидком сплаве и связаны со сменой вязкости вследствие увеличения координационного числа [4]. Так как в результате «старения» в расплаве солей происходят изменения в строении и составе расплава солей, то представляется возможность контроля этого процесса с помощью метода АЭ.

Постановка задачи. Определение изменения характера и интенсивности диффузионного насыщения при карботитанировании методом акустической эмиссии в процессе технологического «старения» насыщающей среды ИВС.

Методика проведения исследований. Исследование проводили на образцах (Ø15×2 мм) из стали 60. Перед обработкой образцы полировали до R_a = 0,4 мкм, промывали в бензине и спирте, затем высушивали. Карботитанирование проводили в расплаве солей 90 %KCl + 10 % (TiO_2 , TiC, Ti, FeTi, $BaTiO_3$). Температура расплава солей —1000 ºС, время изотермической выдержки —1 ч. Диффузионное насыщение производилось в индукционной соляной печи-ванне с графитовым тиглем модели ИВС–ЛГ 0,4/0,6, подключенной к установке ТВЧ модели ЛЗ–13 (частота генерации 440 кГц). Температура измерялась и автоматически регулировалась при помощи термопары ТПП и регулятора температуры Ш4501.

Контроль процесса технологического «старения» насыщающей среды осуществляли методом АЭ. Образцы монтировали и подвешивали в ИВС на стальной пластине, с закрепленным на ней датчиком акустико-эмиссионного комплекса A-Line 32.

Комплекс A-Line 32 представляет собой многоканальную систему регистрации событий АЭ и позволяет проводить параллельно до 8 экспериментов. Частотный диапазон используемых пьезодатчиков составлял 100-500 кГц. Исследуемый образец в процессе расплавления соли и последующих процессов (засыпка карбюризатора, добавление соли, охлаждение печи) не соприкасался со стенками графитового тигля, следовательно, регистрируемые акустические сигналы не были «паразитными» и являлись результатом исключительно физико-химическмх процессов химико-термической обработки металла в индукционных соляных печах-ваннах.

Микроструктурный анализ поверхностных слоев и сечения образцов производили на металлографическом микроскопе МИМ-8. Для исследования микроструктуры образцы полировали и подвергали травлению в 4%-ом спиртовом растворе HNO_3.

Результаты исследования и их обсуждение. Металлографический анализ образцов показал, что после карботитанирования на поверхности образцов образовались сплошные, плотные, хорошо сцепленные с основой светлые слои, не окисляющиеся при травлении.

Средняя толщина карботитанового слоя, полученная на образцах за 1 ч, при ХТО в ИВС составила 0,010…0,012 мм, что практически соответствует толщине титанового слоя, полученного при жидкостном титанировании в тигельных соляных печах-ваннах (тигель металлический, расплав 90 % NaCl и 10 % TiO_x, под защитой аргона, выдержка 4 ч).

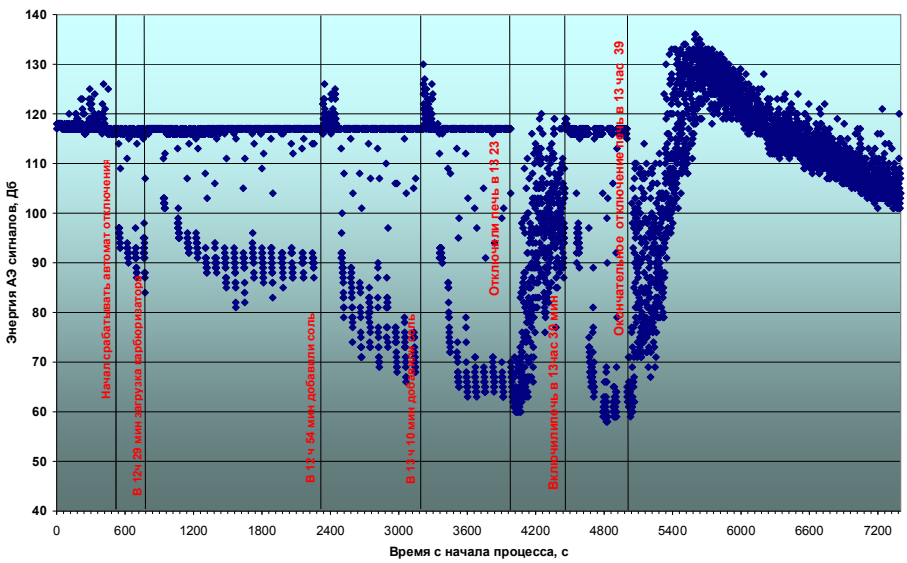
Таким образом, можно констатировать, что ХТО в ИВС позволяет в четыре раза сократить время диффузионного насыщения при значительном упрощении технологии обработки.

Экспериментальное исследование показало, что в процессе эксплуатации ИВС с графитовым тиглем при карботитанировании наблюдается снижение активности процесса насыщения образцов в соляной ванне. По-

лученные методом АЭ данные позволяли с помощью компьютера фиксировать малейшие изменения в процессе КИХТО. Однако при включении установки ТВЧ на нагрев графитового тигля процесс контроля прекращался вследствие высокого уровня помех. Имеющиеся на приборе АЭ фильтры нейтрализовать «шумы» ТВЧ не смогли. Для исследования использовали «паузы» в работе установки ТВЧ.

С момента начала разогрева печи зарегистрировано индуцирование акустических сигналов, причем их характеристики, в частности, амплитуда, энергия и длительность, с самого начала свидетельствовали о многостадийности и интенсивности процесса. Изменение энергии сигналов АЭ на различных стадиях процесса обработки металлического образца в соляной печи-ванне лишь в незначительной мере иллюстрирует все информационное многообразие акустико-эмиссионного метода (рисунок).

Далее будет проанализирована динамика параметров АЭ на каждой стадии. Тем не менее, следует указать, что во время нахождения печи под током возникающая наводка существенно затрудняла проведение измерений. В частности, в период разогрева печи активность АЭ составляла единицы сигналов ввиду их высокой длительности, превышающей порог дискриминации аппаратуры. Тем не менее, такой параметр, как количество осцилляций, достаточно эффективно отражал процесс набора температуры образцом. В момент выхода печи на заданный уровень температур срабатывал автоматический регулятор набора мощности, печь отключается на 30-40 секунд. Даже кратковременное отключение печи приводит к некоторому снижению температуры в тигле и образце.



Изменение энергии сигналов АЭ на различных стадиях процесса ХТО металлического образца в ИВС

В отсутствие электрических наводок в этот период все акустико-эмиссионные параметры отражают динамику остывания печи. И если дли-

тельность сигналов и амплитуда имеют тенденцию к снижению, то активность АЭ (число импульсов в секунду) растет, достигая некоторого порога насыщения. Интересно отметить, что по мере расходования реагентов (соль частично испаряется и частично реагирует с поверхностью металлического образца) длительность сигналов снижается менее интенсивно. Так, в начальный период насыщения (10 час 44 мин) параметр T_0 через 10 секунд после отключения печи составлял 2000 мкс, в середине процесса (10 час 59 мин) уже 10000 мкс, а на заключительной стадии процесса – 25000 мкс. Поскольку длительность акустического сигнала связана с активностью обратно пропорциональной зависимостью, мы наблюдаем снижение активности сигналов на различных этапах процесса. В случае добавления реагентов в тигель ожидаемого возвращения динамики АЭ сигналов не происходит, что связано, по-видимому, со снижением химической активности поверхности металлического образца и насыщением активных центров. Наиболее наглядно это видно по изменению количества осцилляций при отключении печи. В начальный период, когда активность поверхности высока, химическое взаимодействие расплава солей с металлом индуцирует значительное количество слабых сигналов АЭ, амплитуда которых не превышает пороговый уровень (осцилляции). Спустя полчаса пребывания исследуемого образца в расплаве, их химическое взаимодействие значительно снижается ввиду уменьшения количества свободных активных центров, что приводит к соответствующему снижению и количества осцилляций.

После завершения процесса и полного отключения печи наряду со снижением температуры наблюдается и постепенный рост вязкости расплава вплоть до момента застывания массы. В совокупности эти процессы легко идентифицируются как по изменению энергии сигналов АЭ, так и по изменению длительности сигналов, количества выбросов, времени нарастания и амплитуды сигналов. Следует отметить сложный характер изменения длительности сигналов АЭ. В первые секунды после отключения печи наблюдается экспоненциальное снижение длительности сигналов с порогового уровня (65000 мкс) до значений 100-200 мкс, но по мере охлаждения печи длительность сигналов вновь растет, снова доходя до порогового уровня 65000 мкс.

Таким образом, несмотря на значительную напряженность высокочастотного электромагнитного поля в ИВС и попадания частоты генерации установки ТВЧ (440 кГц) в рабочий интервал частот пьезодатчика АЭ (100-500 кГц), система АЭ во время паузы в нагреве ИВС успевает восстанавливаться и продолжать контроль процессов КИХТО. При этом в течение нескольких часов имеется возможность фиксирования изменения интенсивности процессов КИХТО в ИВС. При достаточном объеме такого экспериментального материала для технологий КИХТО можно определить нормы и периодичность введения компенсирующих «старение» добавок «свежей» смеси солей. При значительном снижении активности насыщающей среды контроль методом АЭ позволяет предупредить получение бракованной продукции и задержать загрузку новой партии изделий до восстановления

состава среды в ванне, обеспечивающего получение качественной продукции при КИХТО.

Выводы. 1. Апробирована новая технология диффузионного насыщения в многокомпонентном расплаве солей — карботитанирование в ИВС. В результате скорость диффузионного насыщения сократилась в четыре раза по сравнению с титанированием в тигельных соляных ваннах.

2. Прямыми экспериментами доказано, что при проведении ХТО в ИВС регистрируется индуцирование акустических сигналов, несмотря на значительную напряженность высокочастотного электромагнитного поля в ИВС и попадание частоты генерации установки ТВЧ в рабочий интервал частот пьезодатчика АЭ.

3. В результате экспериментального исследования получена акустико-эмиссионная информация, которая в реальном масштабе времени отражает изменения, происходящие при карботитанировании в многокомпонентном расплаве солей в результате технологического «старения». Анализ данной информации показал, что характеристики сигналов АЭ (амплитуда, энергия и длительность) свидетельствуют о многостадийности и интенсивности процесса.

4. Необходимо проведение дальнейших исследований для установления корреляционной зависимости между характеристиками процесса «старения» расплава солей и параметрами акустической эмиссии.

Библиографический список

1. *Ляхович Л.С.* Химико-термическая обработка металлов и сплавов. / Л.С. Ляхович и др.: справочник. - М.: Металлургия, 1981. - 424 с.

2. *Симоненко А.Н.* Жидкостная химико-термическая обработка в высокочастотном электромагнитном поле индукционных соляных печей-ванн / А.Н.Симоненко, С.А.Пашко, А.А.Новиков, Д.Ю.Нестеров // Действие электрических полей (электрического тока) и магнитных полей на объекты и материалы: сб. мат. Всерос. науч. семинара. - М.: ИМАШ РАН, 2002. - С.70-71.

3. *Симоненко А.Н.* Унос и летучесть расплавленных солей при «старении» в индукционных соляных печах-ваннах / А.Н.Симоненко, В.А.Курдюков, С.А.Пашко, Д.Ю.Нестеров // Интеграция отраслевой и вузовской науки: проблемы современного машиностроения: мат. Междунар. науч.-техн. конф., 2001. – Ростов н/Д: РГАСХМ, 2001. - С.160.

4. *Семашко Н.А.* Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. / Н.А.Семашко, В.И.Шпорт и др. - М.: Машиностроение, 2002. - 240 с.

Материал поступил в редакцию 17.05.08.

A.N. SIMONENKO, D.M. KUZNECHOV, S.A. PASHKO

MNOGOKOMPONENTNOE KONVEKCIONNO-INDUKCIONNOE KARBOTITANOSIANIROVANIE IN THE HEATED UP SALTS

The study of the karbotitanosianirovanie process in multycompounds melt salts, in radio-frequency electromagnetic field was considered. At was shown the possibility of checking of "diligences" melt salts by means of acoustic emission experimental method.

СИМОНЕНКО Александр Николаевич (р.1931), доцент кафедры «Материаловедение» РГАСХМ (1978), кандидат технических наук (1974). Окончил КуАИ в 1955.
Сфера научных интересов - термическое оборудование, химико-термическая обработка в высокочастотном электромагнитном поле соляных печей-ванн.
Является автором около 100 научных трудов, 5 изобретений, одной полезной модели.

КУЗНЕЦОВ Дмитрий Михайлович (р.1959), проректор по НИР РГАСХМ (2005), доктор технических наук (2002). Окончил Уральский политехнический институт имени С.М. Кирова в 1981.
Сфера научных интересов - акустическая эмиссия, химия углерода.
Автор 80 научных трудов.

ПАШКО Светлана Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Материаловедение» РГАСХМ. Окончила РГАСХМ (1998), очную аспирантуру (2003).
Сфера научных интересов - термическое оборудование, химико-термическая обработка в высокочастотном электромагнитном поле соляных печей-ванн.
Опубликовано 16 научных работ, является автором одной полезной модели.

УДК 541.64+629.114.6:66(08)

С.Г. КУРЕНЬ, А.Д. ДЬЯЧЕНКО, Н.А. СОКОЛ, С.С. ВАССЕЛЬ

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА АВТОМОБИЛЬНОГО АНТИФРИЗА

Проведено квантово-химическое изучение методом ab initio в базисе DZV структуры и стабильности компонентов антифриза: воды H_2O, этиленгликоля CH_2OH-CH_2OH и их димеров различного состава. Показано, что при постепенном понижении температуры происходят самоорганизация на молекулярном уровне и структурирование водно-спиртовой среды, упорядочение и переход в твердое состояние при низкой температуре (-75°С), причем при определенном оптимальном соотношении воды и спирта в смеси.
Ключевые слова: *антифриз, квантово-химическое моделирование, неэмпирические расчёты, энергия комплексообразования, ассоциаты.*

Введение. В России эксплуатируется более 96% автотранспортных средств, оборудованных жидкостной системой охлаждения. Большинство неисправностей автомобиля, требующих дорогостоящего ремонта, связано с отказами основных элементов системы охлаждения, которые приводят к перегреву двигателя. Основной причиной перегрева является большое отложение накипи в рубашке охлаждения двигателя, следствием чего является ухудшение теплоотдачи от поверхности к охлаждающей жидкости. В свою очередь сильный нагрев деталей может привести к заклиниванию поршней в цилиндре, обгоранию головок клапанов, выгоранию смазки, выплавлению вкладышей подшипников и другим неисправностям.

Основной охлаждающей жидкостью автомобиля является антифриз. Автомобильные антифризы должны удовлетворять следующим требованиям: высокая теплоемкость; теплопроводность и низкая температура замерзания; высокие температура кипения и температура воспламенения; малая вязкость; малая вспениваемость. Совершенствование состава антифриза невозможно в современных условиях без исследования физико-химических свойств компонентов среды на молекулярном уровне и применения нанотехнологий.

Постановка задачи. *Антифриз* **(***тосол)* предназначен для охлаждения двигателей автомобилей в любое время года при температурах до минус 65°С. Наиболее часто в технике применяют антифризы, содержащие 52,6% и 66% этиленгликоля, воду и ряд противокоррозионных и других присадок. Известны антифризы на основе водно-глицериновых растворов. Так, смесь 70% (по массе) глицерина и 30% воды замерзает при – 40°С, однако уступает этиленгликолевым антифризам по вязкости и теплофизическим свойствам. Иногда применяют водные растворы метилового, этилового и изопропилового спиртов; 50%-ный раствор метанола замерзает при – 43°С, имеет малую вязкость, однако легко испаряется. Физико-химические свойства рабочих жидкостей антифриза представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики рабочих сред антифриза

№	Наименование	Химическая формула	Мольная масса, 10^{-3} кг/моль	Плотность [20 °С], кг/м^3	$T_{пл}$, °С	$T_{кип}$, °С	Динамическая вязкость [20 °С], 10^{-3} Па·с
1	Метанол	CH_3OH	32,04	792,8	-93,9	64,7	0, 578
2	Этиленгликоль	$(CH_2OH)_2$	62,07	1116,0	-13,2	197,2	19,90
3	Глицерин	$CH(OH)(CH_2OH)_2$	92,09	1261,3	17,9	290,0	1480,0
4	Вода	H_2O	18,02	98,2	0,0	100,0	1,009

В России ГОСТ 28084-89 "Жидкости охлаждающие низкозамерзающие. Общие технические условия" нормирует основные показатели охлаждающих жидкостей (ОЖ) на основе этиленгликоля (концентрата, ОЖ-40, ОЖ-65): внешний вид; плотность; температуру начала кристаллизации; коррозионное воздействие на металлы; вспениваемость; набухание резины и т.д. Но он не оговаривает состав и концентрацию присадок, а также смешиваемость жидкостей. Это, а также цвет ОЖ (синий, зеленый, желтый и т.п.) выбирает изготовитель. ГОСТов, регламентирующих срок службы антифриза и условия ресурсных испытаний, пока нет. Техническая сертификация ОЖ необязательна. Технические требования к антифризам изложены в ТТМ 1.97.0717-2000 и ТТМ 1.97.0731-99.

Таблица 2

Сравнительная характеристика физико-химических свойств воды и этиленгликоля

Показатель	Вода	Этиленгликоль
Мольная масса, 10^{-3} кг/моль	18,01	62,07
Плотность при 20°С, кг/м^3	998,2	1113
Температура замерзания, °С	0	-12
Температуры кипения при 0,1 МПа, °С	100	197,7
Теплоемкость при 20°С, кДж/(кг∗°С)	4,184	2,422
Коэффициент теплопроводности, кДж/(ч∗м∗°С)	2,179	0,955
Вязкость при 20°С, Па∗с	1,0	19-20
Теплота испарения, кДж/кг	2,258	0,800
Коэффициент объемного расширения (0-100 °С)	0,00046	0,00062

Свойства воды как теплоносителя (теплопроводность, теплоемкость и вязкость) существенно лучше, чем у этиленгликоля, что видно из табл. 2. Однако использование гликолевых растворов позволяет существенно понизить температуру замерзания, в чем, собственно, и заключается основной смысл использования антифризов. Основа большинства антифризов - двухатомный спирт этиленгликоль, благодаря своему химическому строению способен в определённой степени обеспечивать необходимый антифризу набор свойств. Современные достижения нанотехнологии позволяют модифицировать свойства технологических жидкостей на основе регулирования их молекулярного состава, поэтому в первую очередь исследовано взаимовлияние компонентов среды на молекулярном уровне.

Методика исследований. Для достижения намеченной цели был избран подход на основе квантово-химических расчетов геометрических и энергетических характеристик воды (H_2O), этиленгликоля (EtG) и их ассоциатов мощным квантово-химическим программным комплексом GAMESS, что привело к необходимости поиска соответствующего расчетного базиса и адаптации методики квантово-химического моделирования процессов самоорганизации компонентов жидкой фазы при переходе в конденсированное состояние.

Результаты исследований и их обсуждение. Квантово-химические расчеты компонентов среды проведены по программе GAMESS в приближении Hartree-Fock методом ab initio. Полная оптимизация геометрии соединений, отвечающих энергетическим минимумам на поверхности потенциальной энергии (ППЭ), проведена до величины градиента 10^{-6} Hartree·Bohr^{-1}. Выбор был сделан в пользу программного комплекса GAMESS по следующим аргументам:

GAMESS представляет собой неэмпирический квантово-химический пакет;

неэмпирические методы расчета позволяют определить свойства молекулярных структур или эффектов, которые затруднительно или невозможно (переходные состояния реакций, трибо- и электрохимические превращения in situ) определить экспериментально.

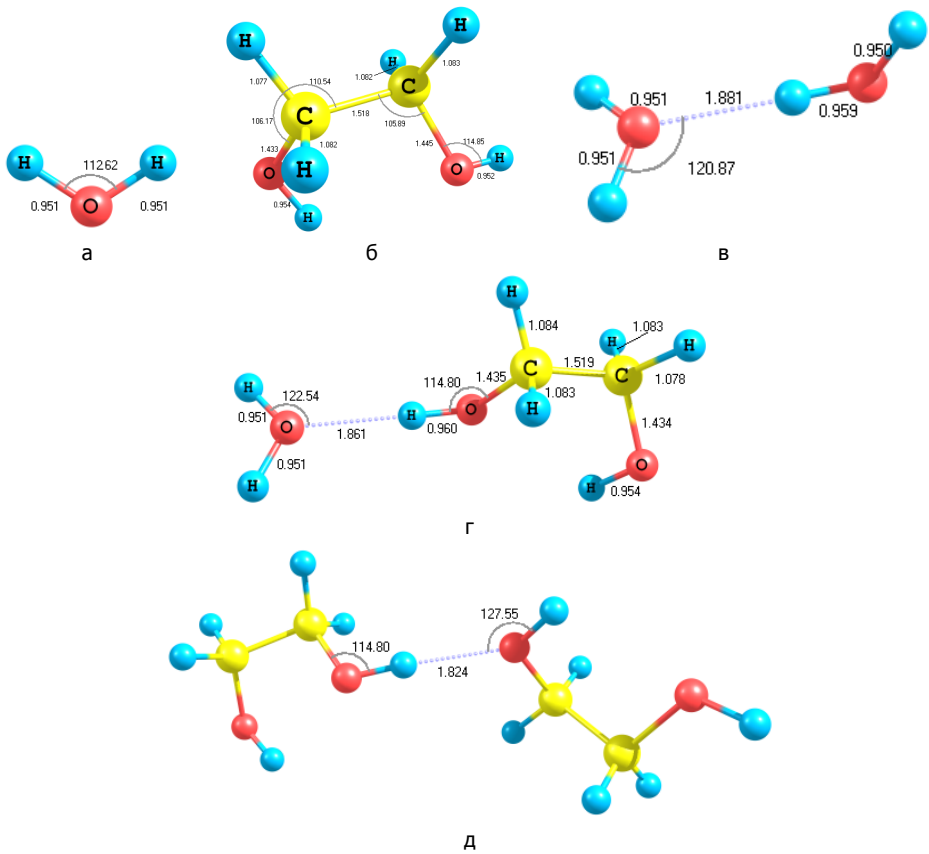


Рис 1. Геометрические характеристики сольвентов H_2O (а), EtG (б) и наиболее стабильных ассоциатов $(H_2O)_2$ (в), EtG ·H_2O (г), $(EtG)_2$ (д)

На основе результатов квантово-химических расчетов (рисунок, табл.3) получены значения полных энергий Е (а.е.) и энергий комплексообразования $E_к$ (кДж/моль) сольвентов: H_2O (а), EtG (б) и наиболее стабильных ассоциатов $(H_2O)_2$ (в), EtG $\cdot H_2O$ (г), $(EtG)_2$ (д). По данным значений энергий комплексообразования компонентов среды антифриза выведена закономерность влияния водородных связей между молекулами среды на структуризацию водно-спиртовой фазы антифриза за счет самоорганизации и понижения температуры его замерзания в зависимости от содержания в воде этиленгликоля.

Таблица 3

Полные энергии Е (а.е.) и энергии комплексообразования $E_к$ (кДж/моль) компонентов антифриза (в соответствии с рис. 1)

Структура	Е	$E_к$
а	-76,01093	–
б	-228,88607	–
в	-152,03405	-31,844
г	-304,91016	-34,777
д	-457,78650	-37,710

Из полученных данных квантово-химических расчетов (см. табл.3) следует, что димер воды имеет меньшую энергию стабилизации (ΔЕ=-31,844 кДж/моль) по сравнению с димером этиленгликоля (ΔЕ=-34,777 кДж/моль), что говорит об образовании более сильных водородных связей между молекулами двухатомного спирта этиленгликоля по сравнению с водой. Следовательно, по этой причине вода по сравнению с этиленгликолем имеет (см. табл.2) меньшую плотность и вязкость, а также более высокую температуру замерзания и более низкую температуру кипения.

Смесь воды с этиленгликолем имеет более низкую температуру замерзания (табл.4), чем чистая вода, поскольку значительное влияние оказывают сильные водородные связи между молекулами воды и этиленгликоля. При постепенном понижении температуры происходит самоорганизация на молекулярном уровне и структурирование водно-спиртовой среды, упорядочение и переход в твердое состояние при низкой температуре (-75°С) (см. табл.4), причем при определенном оптимальном соотношении воды и спирта в смеси.

Таблица 4

Физико-химические свойства водных растворов этиленгликоля

Концентрация этиленгликоля, мас %	Плотность [20 °С], г/см^3	Температура замерзания, °С
26,4	1,0340	-10
36,4	1,0506	-20
45,6	1,0 27	-30
52,6	1,0713	-40
58,0	1,0780	-50
63,1	1,0833	-60
66,0	1.0850	-65
66,7	1,0856	-75
72,1	1,0923	-60
78,4	1,0983	-50

За счет межмолекулярных водородных связей возможно образование ассоциатов типа: $H_2O{\cdot}EtG$; $H_2O{\cdot}EtG{\cdot}H_2O$; $H_2O{\cdot}(EtG)_2{\cdot}H_2O$; $(H_2O)_2{\cdot}(EtG)_2$; $(H_2O)_2{\cdot}EtG{\cdot}H_2O$; $(EtG)_2{\cdot}H_2O$; $(H_2O)_2{\cdot}EtG{\cdot}(H_2O)_2$ и др. На рисунке представлен такой ассоциат (см. структура г). Для первых трех комплексов $H_2O{\cdot}EtG$; $H_2O{\cdot}EtG{\cdot}H_2O$; $H_2O{\cdot}(EtG)_2{\cdot}H_2O$ массовая доля спирта равна 77,5%, 63,3%, 77,5%, что соответствует концентрации этиленгликоля, при которой происходит значительное понижение температуры замерзания антифриза.

В отличие от воды антифриз при замерзании не расширяется и не образует твёрдой сплошной массы, а образуется не препятствующая запуску двигателя рыхлая масса вышеуказанных кристаллогидратов этиленгликоля, быстро переходящая в жидкое состояние после пуска двигателя, что облегчает эксплуатацию автомобиля.

Квантово-химические расчеты позволили выяснить механизм агрегации и перехода антифриза на основе этиленгликоля в конденсированное состояние, что может представлять интерес при исследовании свойств антифризов на другой основе с целью усовершенствования их эксплуатационных характеристик.

Выводы. Квантово-химические расчеты подтвердили, что вода по сравнению с этиленгликолем должна иметь меньшую плотность и вязкость, а также более высокую температуру замерзания и более низкую температуру кипения за счёт образования более прочных водородных связей между молекулами двухатомного спирта по сравнению с водой.

Образование сильных водородных связей между молекулами этиленгликоля и воды – причина значительного понижения температуры замерзания смеси этиленгликолем с водой.

Содержание спирта в воде в молярном соотношении «спирт:вода» 1:1, 1:2, при котором массовая доля спирта равна 77,5%, 63,3% соответственно, приводит к наибольшему понижению температуры замерзания антифриза. При замерзании антифриз образует кристаллогидраты состава $H_2O{\cdot}EtG$; $H_2O{\cdot}EtG{\cdot}H_2O$; $H_2O{\cdot}(EtG)_2{\cdot}H_2O$.

Библиографический список

1. Техническое обслуживание автомобилей. / А.А.Газарян. - М.: Издательский дом «Третий Рим», 2000. - 272 с.

2. *Кузнецов Е.С.* Техническая эксплуатация автомобилей / Е.С.Кузнецов, А.П.Болдин, В.М.Власов и др.; под. ред. Е.С.Кузнецова. - М.: Наука, 2001.- 535 с.

3. *Минкин В.И.* Теория строения молекул. / В.И.Минкин, Б.Я.Симкин, Р.М.Миняев / Сер. Учебники и учебные пособия. – Ростов н/Д: Феникс, 1997. – 560 с.

4. *Schmidt M.W.* GAMESS, VERSION / M.W. Schmidt, K.K. Baldridge, J.A. Boatz и др. // J. Comput. Chem. - 1993. - 14. - P. 1347-1363.

5. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости. / С.И.Ананьев. - Волгодонск, 1997.-128 с.

Материал поступил в редакцию 12.05.08.

S.G. KUREN, A.D. DIACHENKO, N.A. SOKOL, S.S. VASSEL

OPTIMISATION OF AUTOMOBILE ANTIFREEZE COMPOSITIONS

A quantum chemical study of the structure and stability of such antifreeze components as water and glycol has been undertaken using *ab initio* method in DZV basis.
It is shown, that if ratio of water and glycol is optimal, decreasing of temperature leads to self-organization in the molecular level and structuring of water-spirit mixture and conversion to the solid state in low temperature (-75 ^{o}C).

КУРЕНЬ Сергей Григорьевич (р.1955), доцент кафедры "Сервис и техническая эксплуатация автотранспортных средств" ДГТУ, кандидат технических наук (2007). Окончил химический факультет РГУ (1977).
Научные интересы связаны с квантово-химическим исследованием свойств технологических жидкостей и активных компонентов смазки в самоорганизующихся трибосистемах.
Автор более 80 публикаций.

ДЬЯЧЕНКО Анатолий Дмитриевич (р.1950), заведующий кафедрой "Сервис и техническая эксплуатация автотранспортных средств" ДГТУ (2005), доктор технических наук (2004), профессор (2008). Окончил РИСХМ (1976).
Научные интересы связаны с гидромеханическими приводами в мобильных сельхозмашинах.
Автор более 95 публикаций.

СОКОЛ Николай Александрович (р.1940), доцент кафедры "Сервис и техническая эксплуатация автотранспортных средств" ДГТУ, кандидат технических наук (1970). Окончил АЧИМСХ (1962).
Научные интересы связаны с механикой в области земледелия.
Автор более 100 публикаций.

ВАССЕЛЬ Сергей Сергеевич (р. 1979), старший преподаватель кафедры физики и математики филиала МГУТУ в г. Ростове-на-Дону, кандидат биологических наук (2006). Окончил РГУ (2002).
Научные интересы связаны с математическим моделированием процессов в биологических средах.
Автор 15 публикаций.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ДГТУ»

1. Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном через 1,5 интервала на белой бумаге форматом А4, поля: верхнее, нижнее, левое – 2,5 см, правое – 1,5 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 14. Одновременно текст статьи представляется на дискете (1,44 Мбайт) в формате текстового редактора «Word for Windows 6.0».

2. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов;
- e-mail для переписки;
- полное название статьи;
- краткая (5-10 строк) аннотация;
- ключевые слова.

Затем идет текст самой статьи, список литературы.

Статья должна быть завершена рефератом на английском языке, включающем инициалы, фамилии авторов и полное название статьи.

Статья должна содержать разделы. Рекомендуется следующая рубрикация статьи: «Введение», «Постановка задачи», «Методы испытаний», «Результаты эксперимента и их обсуждение», «Выводы».

3. Объем статьи не должен превышать 10 страниц машинописного текста, 5 рисунков или фотографий; обзора – 25 страниц, 10 рисунков; краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь подпись. Рисунки должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок.

4. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в формульном редакторе MS Word.

5. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.).

6. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-2003.

7. На отдельной странице должны быть представлены краткие сведения об авторах статьи.

8. К статье должны быть приложены акты экспертизы, подтверждающие возможность ее опубликования в открытой печати.

9. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

10. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и дискеты авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.